



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NANO A MIKROBUBLINY VYTVOŘENÉ KAVITACÍ

NANO AND MICROBUBBLES CREATED BY CAVITATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Přemysl Harazin

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Přemysl Harazin**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nano a mikrobubliny vytvořené kavitací

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nano a mikrobubliny jsou velmi malé bubliny s průměrem v řádu stovek nanometrů až jednotek mikrometrů. Vzhledem ke své velikosti na ně působí velmi malé vztahové síly a jejich struktura je velmi stabilní. V současné době se používají např. v bioreaktorech pro kultivaci řas, separaci velmi malých pevných částic nerostů od hlušiny, aeraci kapalin nebo snížení tření při obtékání. □

Čím menší bublina, tím větší problém ji vyrobit. Jednou z možností je využít kavitace, tedy jevu, kdy dochází při velmi nízkých tlacích ke vzniku bublin obsahujících syté páry a vzduch. Při kolapsu dochází k roztržení bublin na mikro až nanobubliny.

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod, definice základních pojmů, formulace problému
2. Rešerše stávajícího stavu poznání
3. Návrh experimentu a jeho realizace (vizualizace proudění, rychlokamera)
4. Vyhodnocení, závěr

Seznam literatury:

Tesař, V.: Microbubbles - mechanism of their generation and application in producing biofuels , Summer school, Prague, 2014

Wu, C., Nasset, K., Masliyah, J., Xu, Z.: Generation and characterization of submicron size bubbles, Advances in Colloid and Interface Science, Volumes 179–182, 2012

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

V práci je řešena problematika rozeznávání velmi malých bublin a částic, tvoření a termodynamická stabilita bublin, přičemž na začátku textu je řešením způsobem zpracována kavitace. V experimentální části je řešen problém vizualizace a určení množství bublin a možnosti ovlivnění množství a velikosti bublin při použití překážek.

Problém vizualizace bublin byl řešen za pomoci prosvícování průhledné trubice laserovým paprskem a následným vyhodnocením pomocí softwaru. Problém možnosti ovlivnění množství a velikosti bublin byl řešen pomocí vkládání ocelového sítka do proudu, díky čemuž docházelo k ovlivnění proudu.

Provedeným experimentem jsme zjistili, že laserový paprsek umožňuje, při vhodných okolních podmínkách, dobrou vizualizaci bublin a částic a tedy i možnost výpočtu množství bublin pomocí softwaru. Využití ocelového sítka umožnilo tvoření většího počtu malých bublin.

Abstract

This work solves the problematics of distinguishing tiny bubbles and particles as well as the thermodynamics of bubbles and their creation. The process of cavitation is described in the first part of the thesis. The problem of visualisation and counting the number of bubbles is described in the experimental part as well as the possibility of influencing the stream through the input of obstacles.

Problem with visualisation was dealt with laser beam shining through the transparent tube with software postprocessing. The issue of influencing the stream was dealt with input of the strainer into the stream.

Results of these experiments are, that with good ambient light situation, the laser beam ensures good visualisation of bubbles and particles and therefore the possibility of counting the number of bubbles with the help of a software. The usage of strainer helped to create bigger number of tiny bubbles.

Klíčová slova: nanobubliny, mikrobubliny, kavitace,

Key words: nanobubbles, mikrobubbles, cavitation,

Bibliografická citace

HARAZIN, P. *Nano a mikrobubliny vytvořené kavitací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 58 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma *Nano a mikrobubliny vytvořené kavitací* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a dostupných parametrů uvedených v seznamu literatury, který tvoří tuto práci.

V Brně dne 26.5.2016

.....

Přemysl Harazin

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval docentu Rudolfovi za rady a pomoc s vypracováním mé bakalářské práce. Zároveň chci poděkovat inženýru Kozákovi za pomoc se softwarovým zpracováním vizualizace bublin, inženýru Hudci a panu Kusému za veškerou pomoc při experimentálním měření a docentu Jedelskému za zapůjčení laserové stěny a příslušenství.

Obsah

1	Úvod	11
2	Základní pojmy	12
3	Kavitace	15
3.1	Kavitační jádra	15
3.2	Kavitační a ztrátový součinitel	17
3.3	Generování a stupně kavitace	18
3.4	Difuze plynu	20
4	Mikro a nanobubliny	22
4.1	Generování mikro a nanobublin	22
4.2	Vlastnosti mikro a nanobublin	25
4.3	Rozeznávání nanobublin	27
4.4	Termodynamická stabilita bublin	29
5	Využití kavitace, nano a mikrobublin v praxi.....	33
5.1	Vodní dezinfekce	33
5.2	Pěnová flotace	33
5.3	Mazání a tření	34
5.4	Zlepšení růstu rostlin	35
6	Experiment – možnosti využití laserového paprsku a fotoaparátu pro zachycení nano a mikrobublin	37
6.1	Metoda pokusu	37
6.2	Výsledky pokusu	38
6.3	Vyhodnocení pokusu	41
7	Experiment – určení množství bublin a hydraulických ztrát při připojení překážky do okruhu	42
7.1	Experimentální okruh	42
7.2	Výsledky experimentu	44
7.3	Vyhodnocení experimentu	47
8	Závěr	49
9	Seznam použitých zdrojů	51

10	Seznam použitých symbolů a zkratk	55
11	Seznam obrázků a tabulek	57
12	Seznam příloh	58
12.1	Příloha A	58
12.2	Příloha B	58
12.3	Příloha C	58

1 Úvod

Tato práce se věnuje problematice tvoření velmi malých bublin za pomoci kavitace. Velmi malé bubliny, dle své velikosti nazývané mikro či nanobubliny, nalézají uplatnění v různorodých odvětvích, například při dezinfekci vody, či při čištění povrchů. Jejich výhoda spočívá v jejich dlouhé životnosti oproti ostatním bublinám, čehož se využívá například k lepšímu provzdušnění vody při pěstování řas. Jeden ze způsobů výroby takovýchto bublin je právě kavitace.

Kavitaci je možno dělit na optickou, akustickou, hydrodynamickou a částicovou. Pro nás je nejzajímavější kavitace hydrodynamická, jelikož je velice levná a nenáročná a tedy má velké šance pro využití v praxi. Existuje množství způsobů, jak hydrodynamické kavitace docílit, v našem případě bylo zvoleno sestavení, kdy bubliny vznikají v důsledku poklesu tlaku kapaliny proudící zúženým místem. Při kolapsu bublin pak mohou vznikat mikro či nanobubliny.

Cílem práce je rešeršním způsobem zpracovat informace o nano a mikrobublinách vytvořených kavitací a pokusit se zachytit je na fotografie za pomoci laserové stěny a fotoaparátu a dále prozkoumat možnosti tvoření velmi malých bublin při vložení překážky do proudu.

2 Základní pojmy

1. Kavitace

„Kavitací nazýváme složitý jev vzniku a zániku dutin v proudící kapalině. Kavitate vzniká při snížení tlaku kapaliny na tlak nasycených par, odpovídající teplotě kapaliny. Za těchto podmínek se začne kapalina odpařovat a tvoří se velmi malé bublinky. Kavitační bubliny jsou unášeny proudící kapalinou, a jakmile se dostanou do oblasti vyššího tlaku, pára v bublinách kondenzuje a vzniknou kavitační dutiny. Do těchto dutin vniká okolní kapalina velkou rychlostí“ [20, s. 19]

2. Fickovy zákony difuze

„Difuze je jedním ze způsobů přenosu hmoty, při kterém se její částice (atomy, ionty, molekuly) i vakance¹ pohybují vzhledem k sousedním částicím. Protože podstatou difuze je tepelný pohyb částic hmoty, je intenzita difuze výrazně závislá na teplotě.“ [24, s. 180]

První Fickův zákon [24, s. 191]:

$$\vec{J} = -D \cdot \nabla c \quad (2.1)$$

kde:

\vec{J}	$[kgm^{-2}s^{-1}]$	difuzní tok
D	$[m^{-2}s^{-1}]$	koeficient difuze uvažované látky
c	$[kgm^{-3}]$	okamžitá objemová koncentrace uvažované látky
∇		Hamiltonův operátor nabla ²

„Difuzní tok má opačný smysl, než gradient koncentrace, což značí, že látka se přenáší z místa o její vyšší koncentraci do místa s její nižší koncentrací a difuze vede k vyrovnaní koncentračních rozdílů.“ [24, s. 194] Pakliže je gradient koncentrace nulový, tak difuze

¹ Vakance – Nepřítomnost částice v uzlovém bodě krystalické mřížky [24]

² $\nabla = \left(\vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \right)$,

kde $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ jsou jednotkové vektory ve směru os x, y, z [24]

neprobíhá. V reálných podmínkách však mohou existovat výjimky. Gradient koncentrace totiž nemusí být jedinou hybnou silou difuze. Mezi další hybné síly je možno zařadit například gradient termodynamické aktivity či gradient koeficientu termodynamické aktivity. [24]

Druhý Fickův zákon [24, s. 191]

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \nabla(D \cdot \nabla c) \quad (2.2)$$

kde:

τ [s] doba difuze

Vyjadřuje zákon zachování hmoty, jelikož v elementu daného objemu platí, že do něj vchází větší množství látky, než z něj vychází a tato látka se tedy v elementu hromadí s postupující dobou difuze. [24]

3. Henryho zákon [14]

U soustav, jejichž složky vzájemně chemicky nereagují, je podle Henryho zákona rozpustnost plynu přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu nad roztokem.

$$p_i = H_i \cdot x_i \quad (2.3)$$

kde:

x_i [–] molární zlomek složky i v kapalně fázi

H_i [–] Henryho konstanta pro složku i

p_i [Pa] parciální tlak složky i v plynné fázi

4. Kapilární tlak a Laplace-Youngova rovnice [15]

Tlak vznikající vlivem povrchového napětí na zakřiveném povrchu kapaliny. Má-li malá část povrchu s povrchovým napětím σ hlavní poloměry křivosti R_1 a R_2 .

$$p_{kap} = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.4)$$

kde:

σ [Nm⁻¹] povrchové napětí na rozhraní mezi látkou A a B

R_1 [m] poloměr křivosti 1

R_1 [m] poloměr křivosti 2

p_{kap} [Pa] kapilární tlak

Jestliže uvažujeme kulovou bublinu, pak $R_1=R_2=R$ a vztah se transformuje na

$$p_{kap} = \frac{2 \cdot \sigma}{R} \quad (2.5)$$

Tento vztah je možné využít pro výpočet tlakové rovnováhy v bublině, kdy tlak uvnitř bubliny je větší než tlak vně bubliny právě o hodnotu kapilárního tlaku

$$p_u = p_v + \frac{2 \cdot \sigma}{R} \quad (2.6)$$

kde:

p_u [Pa] Tlak uvnitř bubliny

p_v [Pa] Tlak vně bubliny

3 Kavítace

Ke kavitaci dochází v kapalině při snížení tlaku za přibližně stejné teploty. Tento děj tedy připomíná var, avšak řídícím mechanismem není změna teploty, nýbrž změna tlaku. Ke kavitaci dojde při snížení okolního tlaku na hodnotu tlaku sytých par kapaliny, nicméně je zapotřebí, aby se v kapalině vyskytovala kavitační jádra. Vytvořené bubliny jsou vyplněny z části plynem a z části parami okolní kapaliny. S následným zvyšováním tlaku dochází ke kondenzaci par, porušení bubliny a kapalina vniká ve velké rychlosti pod značným tlakem na protější povrch bubliny a rozděluje ji. Celou akci je tedy možno charakterizovat jako implozi s následnou tlakovou vlnou. [5, 7, 19, 20]

3.1 Kavitační jádra

Kavitační jádra významným způsobem ovlivňují tahovou pevnost kapaliny a vznik kavitace. V laboratorních podmínkách byla změřena tahová pevnost superčisté vody ve výši cca 28 MPa, v ideálních podmínkách by homogenní kapalina měla být schopna přenést dle [19] 1013 MPa, dle [20, str. 20] by dokonce homogenní kapalina měla být schopna přenést veškeré tahové napětí a ke kavitaci by nemělo vůbec dojít. Za normálních podmínek (voda z kohoutku) však voda tahové napětí není schopna přenést. Rozdíl je v přítomnosti kavitačních jader v kapalině. Kavitační jádra jsou tvořena malými entitami páry, nerozpuštěného plynu a částic, které kapalina nesmáčí, které následně fungují jako koncentrátoři napětí a tedy počáteční místa pro vypařování kapaliny.

Na těchto částicích se již mohou vyskytovat malé bublinky plynu, které při snížení tlaku začnou růst a měnit se v bubliny a dutiny. Důkazem, že se jedná o bublinky nerozpuštěného plynu je fakt, že po tlakování³ vody vzroste tahová pevnost kapaliny, což značí, že působením vysokého tlaku došlo k zániku části kavitačních jader. [5, 19, 20]

Jakmile je bublina vytvořena, začne stoupat díky gravitaci a zároveň je bublina ovlivněna difuzí. Všechny bubliny podléhají difuzi, dochází k výměně plynů rozpuštěných v kapalině s plynem uvnitř bubliny. Většinou však difuzní proces nehraje významnou roli, jelikož pro jeho kompletní dokonání jsou potřeba sekundy, zatímco většina bublin má

³ Tlakování – Na kapalinu působíme vysokým tlakem po daný časový interval, který je většinou v řádech minut.

životnost podstatně kratší (obvykle milisekundy, což však neplatí u nanobublin). Při výpočtech mechanické rovnováhy se tedy s difuzí nepočítá.

Předpoklady pro rovnice (3.3) až (3.7): Bublina je dostatečně malá, aby hodnota rozdílu hydrostatického tlaku bubliny

$$p_{hyd} = 2 \cdot R \cdot \rho \cdot g \quad (3.1)$$

kde:

p_{hyd} [Pa] hydrostatický tlak

ρ [kgm⁻³] hustota kapaliny

g [ms⁻²] tíhové zrychlení

byla zanedbatelná oproti hodnotě rozdílu tlaků odpovídajících povrchovému napětí - viz rovnice (2.5).

Porovnáním pravých stran rovnic (2.5) a (3.1) obdržíme rovnici pro maximální možný poloměr bubliny:

$$R = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot g}} \quad (3.2)$$

Při splnění této podmínky tedy můžeme napsat rovnici:

$$p_v = p_g + p_i - \frac{2 \cdot \sigma}{R} \quad (3.3)$$

kde:

p_g [Pa] tlak par

Je počítáno s tím, že tlak se mění dostatečně pomalu, aby byla neustále dodržena mechanická rovnováha, avšak dostatečně rychle, aby nedošlo k difuzi. Počítá se tedy s izotermickou transformací. Pokud si dále vyjádříme rovnici pro počáteční stav (počáteční stav značen indexem 0):

$$p_{v0} = p_g + p_{i0} - \frac{2 \cdot \sigma}{R_0} \quad (3.4)$$

a

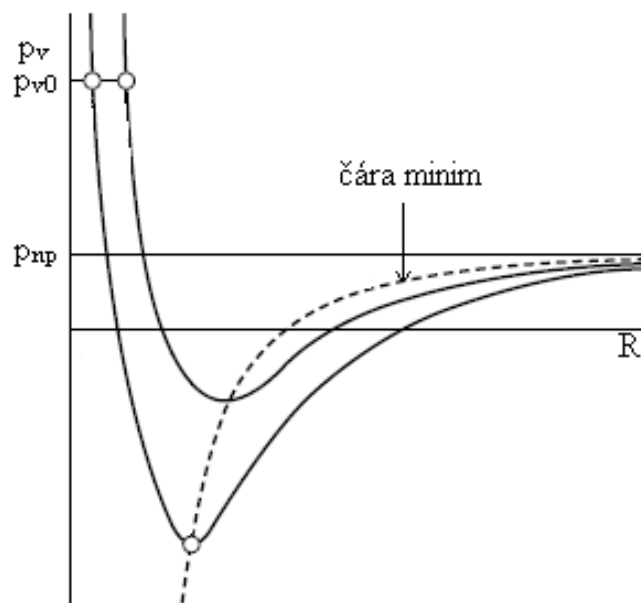
$$p_{i0} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 = p_i \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \quad (3.5)$$

po úpravě:

$$p_i = p_{i0} \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 \quad (3.6)$$

následně dosadíme zpět do rovnice a obdržíme:

$$p_v = p_{i0} \cdot \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 + p_g - \frac{2 \cdot \sigma}{R} \quad (3.7)$$



Obr. 1: Tlak v okolní kapalině v závislosti na poloměru bubliny [7, 19]

Ve stabilním stavu se bublina i po vychýlení snaží navrátit do původní polohy, to odpovídá v grafu (Obr. 1) čáře s negativním sklonem (klesající část grafu). [5, 7, 19, 20]. Více o stavu, ve kterém se mikro a nanobubliny nacházejí, je možné nalézt v kapitole (4.4).

3.2 Kavitační a ztrátový součinitel

Kavitační součinitel (též v literatuře označován jako kavitační číslo, či kavitační parametr) se používá pro zjištění, zda dojde v daném průtočném tělese ke kavitaci, či nikoliv.

$$\sigma_v = \frac{p_x - p_{NP}}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2} \quad (3.8)$$

kde:

p_x	[Pa]	tlak v daném místě
p_{NP}	[Pa]	tlak nasycených par
v	[ms^{-1}]	rychlost proudu v daném průřezu
σ_v	[–]	kavitační součinitel
σ_{vi}	[–]	kavitační součinitel označující počátek kavitace

Součinitel σ_v je porovnáván se součinitelem σ_{vi} a jestliže je $\sigma_v < \sigma_{vi}$, pak dojde ke kavitaci. Hodnota σ_{vi} závisí na viskozitě, povrchovém napětí, velikosti turbulence a dalších faktorech. [7, 20]

Ztrátový součinitel se vypočte pomocí vzorce

$$\xi = \frac{p_x - p_y}{0,5 \cdot \rho \cdot v^2} \quad (3.9)$$

kde:

p_y	[Pa]	tlak v daném místě
ξ	[–]	ztrátový součinitel

3.3 Generování a stupně kavitace

Mezi hlavní metody generování kavitace patří metoda

- a) hydrodynamická
- b) akustická
- c) optická
- d) elektrického výboje.

Metoda elektrického výboje a optická metoda jsou založené na lokálním zvýšení teploty, čili se nejedná přímo o kavitaci, nicméně účinky na kapalinu jsou stejné.

Metoda a) je založena na prudkém zvýšení rychlosti toku, což je spojeno se snižujícím se tlakem, a jestliže se tlak sníží až na tlak sytých par, dojde ke kavitaci.

Metoda b) je založena na vysílání zvukových vln do kapaliny. Zvuk je tlaková vlna šířící se prostorem a proto díky zhušťování a zředňování částic může při správných frekvencích tlak poklesnout až na tlak sytých par a může dojít ke kavitaci.

Metoda c) princip je takový, že dojde k fokusaci elektromagnetického záření do daného místa v kapalině. Záření předá danou část své energie částicím, a jestliže je předaná energie dostatečná, dojde k lokálnímu varu kapaliny, kapalina se v daném místě vypaří a může dojít ke kavitaci.

Metoda d) funguje tak, že do kapaliny jsou ponořeny elektrody a jakmile dojde k výboji, lokálně prudce vzroste teplota, v daném místě se kapalina vypaří a může dojít ke kavitaci.

[1, 5]

Stupně kavitace

1) Počátek kavitace: Formování prvních bublinek při poklesu tlaku na hodnotu p_{NP} nebo těsně pod něj.

2) Částečně vyvinutá kavitace: Přechodný stav mezi počátkem a plně vyvinutou kavitací.

3) Plně vyvinutá kavitace: Vzniká při větším poklesu tlaku pod p_{NP} . Kavitace je již tak mohutná, že ovlivňuje parametry strojů a zařízení.

5) Superkavitace (Obr. 2): Vzniká při velmi nízkých tlacích a vysokých průtokových rychlostech. Malá kavitační dutina začne růst, až kompletně obalí určitý prostor/část tělesa. V celém tomto prostoru je poté pára. [7, 20]



Obr. 2: Superkavitace [7]

3.4 Difuze plynu

Pro pochopení termodynamické stability bublin je velmi důležitá znalost difuze plynu. Plyn se v kapalině vyskytuje ve dvou formách: 1) rozpuštěný v kapalině, 2) obsažený v bublině.

1) Rozpuštěný v kapalině: difuzní rovnováha mezi kapalinou a atmosférou je vyjádřena Henryho zákonem (2.3). Jestliže není dosaženo difuzní rovnováhy, pak existuje koncentrační gradient, který způsobuje pohyb hmoty, což je známo jako Fickův zákon (2.1). Rovnováhu přenosu hmoty poté vyjadřuje klasická rovnice difuze, viz rovnice (2.2).

2) Obsažený v bublině: musí vyhovovat Henryho zákonu a proto

$$C_s = H \cdot p_g \quad (3.10)$$

kde:

C_s $[kgm^{-3}]$ koncentrace při nasycení

C $[kgm^{-3}]$ koncentrace ve velké vzdálenosti od bubliny

Mohou nastat dva případy: a) $C_s < C$, b) $C_s > C$

a) Dochází k difuzi plynu z okolí do bubliny, čímž se zvětšuje poloměr bubliny a bublina rychle zaniká.

b) Dochází k difuzi plynu z bubliny do okolí, poloměr se zmenšuje a bublina opět zaniká (je vstřebávána).

Z a) a b) vyplývá, že bublina, v níž probíhá difuze je vždy nestabilní.

K výpočtu času potřebného k zániku bubliny se používá rovnice, kterou navrhli Epstein a Plesset zintegrováním klasické rovnice difuze:

$$\frac{dR}{dt} = -D \cdot \frac{C_s - C}{\rho_g} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\pi \cdot D \cdot t}} + \frac{1}{R} \right) \quad (3.11)$$

kde:

ρ_g $[kgm^{-3}]$ hustota plynu

Jestliže zanedbáme první člen v závorce, což si můžeme dovolit, když je poloměr bubliny malý vzhledem k tloušťce hranic koncentrační vrstvy, pak je po zintegrování čas do vstřebání nanobubliny při dosazení běžných hodnot pro vzduch vypočten jako:

dosazeno

$$R_0 = 1 \text{ nm}; \rho_g = 1 \text{ kgm}^{-3}; D = 2 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}; C_s = 0,024 \text{ kgm}^{-3}; C = 0 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\tau = \frac{R_0^2}{2 \cdot D} \cdot \frac{\rho_g}{C_s - C} = \frac{(10^{-9})^2}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{1}{0,024} = 10,42 \mu\text{s} \quad (3.12)$$

Vzhledem k experimentálním důkazům, kdy se délka života bublin pohybuje v řádu jednotek až stovek hodin [21, 27, 30], se tedy zdá, že difuze v klasickém pojetí není mechanismem určujícím délku života bublin. [7]

4 Mikro a nanobubliny

Mezi významná témata u bublin je možno zařadit

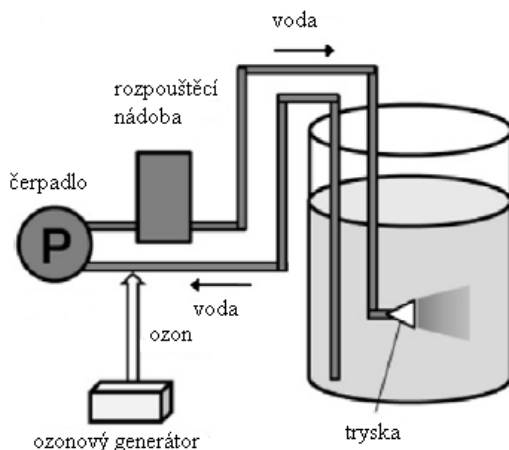
- 1) jejich vlastnosti, jelikož ty určují možnosti využití v praxi.
- 2) způsoby jejich generování, protože každý způsob generování má jinou využitelnost v praxi, energetickou náročnost a požadavky na počáteční investice.
- 3) rozeznávání mezi bublinami a ostatními látkami.
- 4) jejich termodynamickou stabilitu.

4.1 Generování mikro a nanobublin

Na generování mikro a nanobublin má vliv řada faktorů. Mezi doposud objevené faktory patří například hodnota povrchového napětí, teplota vody, přítomnost povrchově aktivních látek (tzv. surfaktantů), hodnota zeta potenciálu⁴, která souvisí s typem plynu rozpuštěného ve vodě, velikost přesycení vody plynem a mnoho dalších. Každý z těchto faktorů se tedy dá využít pro ovlivnění generování mikro a nanobublin. Mezi metody generování mikro a nanobublin můžeme zařadit například metody: DAF (dissolved air flotation), elektrolýza, kavitace (BHIA /baffled high intensity agitation/, pomocí zmenšení průřezu, ultrazvuková kavitace a další), využití fluidního oscilátoru, aerátoru a další. [30]

DAF: V okruhu je zvýšen tlak na přibližně 3 až 4 atmosféry a rozpuštěním dostatečného množství plynu se vytvoří přesycené prostředí. Daný stav je velmi nestabilní, jakmile dojde ke snížení tlaku na hodnotu atmosférického tlaku po průchodu tryskou, dojde k okamžitému vytvoření mraku bublin o průměru bublin 10 – 120 μm . Na obrázku (Obr. 3) je schéma DAF s ozonovým generátorem, který je možno využít pro odbourání zbytkových pesticidů obsažených v zelenině. [6, 11]

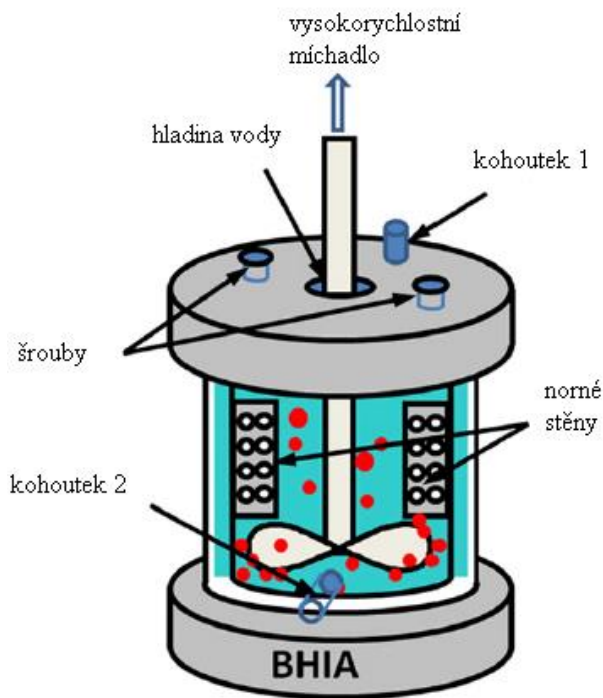
⁴ Zeta potenciál – Zdánlivý náboj pohybující se částice s nábojem [10]



Obr. 3: DAF [11]

Kavitace

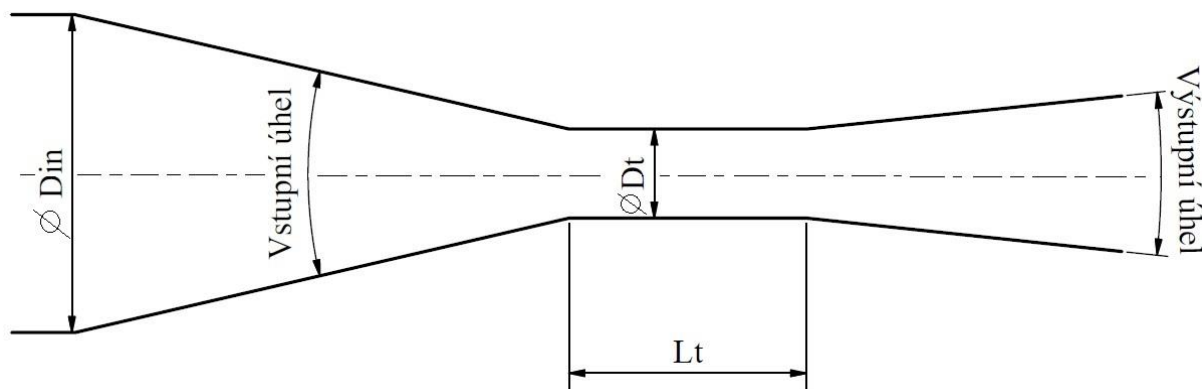
BHIA: Voda je roztáčena v nádobě pomocí vysokorychlostního míchadla a proudí přes otvory v norných stěnách. Při dostatečném počtu otáček míchadla klesne tlak na hodnotu p_{NP} a dojde ke kavitaci. (Obr. 4) [30]



Obr. 4: BHIA [30]

Venturiho dýza: Je složena ze dvou kuželových profilů a jednoho válcového profilu. Voda proudí skrz první kuželový profil (konvergentní), přičemž se snižuje tlak a zvyšuje rychlost.

Jakmile kapalina prochází hrdlem (válcovým profilem), má nejvyšší rychlost a nejmenší tlak a tedy má vhodné předpoklady pro vznik bublin. Za hrdlem poté následuje druhý kuželový profil – divergentní, ve které se zvětšuje tlak a dochází k implozi bublin. Byly zkoumány ideální geometrické parametry Venturiho dýzy pro generování mikro, nano a pikobublin. Vhodné rozměry dýzy jsou uvedeny v tabulce [Tabulka 1]. Obrázek se zakreslenými příslušnými proměnnými je (Obr. 5). [31]



Obr. 5: Venturiho dýza [31]

Tabulka 1: Ideální hodnoty pro Venturiho dýzu [31]

Proměnná	Optimální velikost	Objem nanobublin %	Minimální střední velikost bublin (nm)
D_{in}/D_t	3-4		
L_t/D_t	2,3-3	65-75	150-240
Vstupní úhel (°)	26-27		
Výstupní úhel (°)	11-13		

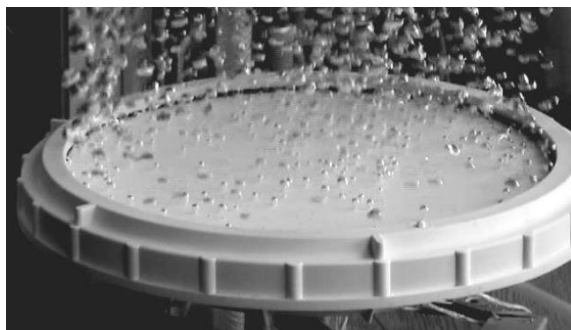
Akustická: Vzniká díky tlakové vlně, která se šíří v kapalině. Zdrojem vlny je kmitající povrch. Akustická kavitace může být i ultrazvuková. Ultrazvuková kavitace se nejčastěji používá pro vytvoření malého počtu bublin na konkrétním místě. Jestliže zdroj vlny je ponořený pod hladinu a kmitá příliš rychle, dojde ke *kavitaci odtržením*. [5, 12]

Magnetostrikce: Jedná se o typ kavitace odtržením. U magnetostrikčního materiálu dochází vlivem změny magnetického pole k mechanické změně. Při působení magnetického pole dochází k rotaci magnetických domén, které jsou v materiálu obsaženy. Rotace domén

způsobí délkové změny materiálu. Jestliže je tedy do materiálu přivedeno alternující elektrické pole, pak při jisté frekvenci dojde k vytvoření stojaté vlny. Tato vlna způsobí dostatečnou změnu tlaku pro generaci kavitace a vytvoření mraku bublin. [5, 23]

Nepřímý piezoelektrický jev: Je založen na stejném principu, jako magnetostrikce. Vlivem změny elektrického pole dochází k mechanické změně. Při působení elektrického pole dojde k přitahování a odpuzování nábojů a tedy dojde ke změně délkových rozměrů materiálu. Jestliže je frekvence změny dostatečná, dojde ke generaci mraku velmi malých bublin. [5]

Aerátor a fluidní oscilátor: Plyn je tryskou vháněn do kapaliny, přičemž v kapalině prochází přes sítko s velmi malými otvory v řádech mikrometrů. (Obr. 6)



Obr. 6: aerátor [26]

Tento způsob je nejméně efektivní, jelikož povrchové napětí brání v odtržení bublin od sítka. Bubliny tedy na sítku rostou a než se odtrhnou, jsou již příliš velké. Využívá se proto fluidního oscilátoru. Oscilátor zajišťuje včasné uvolnění bublin ze sítka a tedy jejich velikost je mnohem menší. [26]

4.2 Vlastnosti mikro a nanobublin

Mikro a nanobubliny jsou bubliny, jejichž velikost se pohybuje v rozmezí 10^{-6} m a 10^{-9} m. Mikro a nanobubliny se používají pro zvýšení difuzního přenosu plynu do kapaliny přes rozhraní. Tím, že se dané množství plynu rozdělí do velkého počtu velmi malých bublin, dojde ke zvětšení rozhraní, skrz které k difuzi dochází. Cílem je tedy vyrábět co největší množství co nejmenších bublin.

Mezi jejich další výhody řadíme jejich nízkou rychlost stoupání k povrchu, což prodlužuje čas, po který difuze plynu z bubliny může probíhat. Podstatnou vlastností bublin je, že se při stoupání k povrchu spojují a to ke zvýšení rychlosti jejich stoupání. Čím menší

tedy budou počáteční bubliny, čím menší budou spojené bubliny, což opět vede k prodloužení difuzního času.

Růst bubliny: Při vzniku bubliny je poloměr křivosti R nekonečný (Obr. 9), jelikož je bublina plochá. Se zvětšujícím se množstvím plynu v bublině se zmenšuje poloměr křivosti a dle Laplace-Youngova zákona se tím pádem zvětšuje tlaková difference napříč rozhraním. Jestliže zastavíme přívod plynu do bubliny, pak při náhlém snížení tlaku v bublině dojde ke zmenšení objemu a v důsledku toho ke zvětšení poloměru křivosti, což má za následek zvýšení tlakové difference napříč rozhraním. Tlaková síla navrací bublinu do původní polohy a bublina je stabilní. To však platí pouze do té doby, než bublina dosáhne velikosti polokoule, pak funguje na opačném principu a její růst je nestabilní.

Přístup dle povrchové energie: Energie je definována jako schopnost konat práci. Práci se v tomto případě myslí vytváření nového rozhraní mezi kapalinou a plynem. Pro představu mějme válec kapaliny. Jestliže tento válec příčně rozdělíme na dvě poloviny, budou vznikat nová rozhraní. Také dojde k porušení kohezních sil mezi molekulami v kapalině. Pokud dostanou válce příležitost pro opětovné spojení, dojde k obnovení kohezních sil a válce se spojí. To je spojeno s konáním práce. V rozděleném stavu tedy válce obsahují jistou energii, která je přímo úměrná velikosti rozhraní, přičemž koeficient úměrnosti je povrchové napětí obsažené v Laplace-Youngově zákoně. Tento přístup dle povrchové energie je výhodný i pro výpočet energie potřebné k rozdělení bubliny na menší bubliny. Je obecně známo, že bublina se jen velmi zřídka rozdělí přesně na dvě poloviny. Mnohem častější je rozdělení na větší a menší bublinu, přičemž menší bublinu poté nazýváme satelit.

Hodnota poměru součtu povrchů obou bublin⁵ a povrchu původní bubliny je stejná, jako hodnota poměru součtu energií obou bublin a energie původní bubliny a tedy:

$$\frac{E_{\text{součtu}}}{E_{\text{původní}}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{(n-1)^{\frac{2}{3}} + 1}{n^{\frac{2}{3}}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{(n-1)^{\frac{2}{3}} + 1}{n^{\frac{2}{3}}}, n \in \mathbb{N} \quad (4.1)$$

Z tohoto poměru je patrné, že největší energetická náročnost je právě pro $n = 2$, tedy když mají obě dvě bubliny shodný poloměr. Proto je mnohem pravděpodobnější vytvoření bublin s různým poloměrem. Pro bublinu o objemu miliardtiny původního objemu pak bude platit:

$$\frac{(n-1)^{\frac{2}{3}} + 1}{n^{\frac{2}{3}}} = \frac{(10^9 - 1)^{\frac{2}{3}} + 1}{10^{9\frac{2}{3}}} = 1,000000999333333 \quad (4.2)$$

Výsledná hodnota se blíží jedné, což znamená, že je energeticky málo náročná a nanobubliny se tedy budou tvořit spíše snadno. [26]

4.3 Rozeznávání nanobublin

Rozeznávání nanobublin je důležité, neboť může dojít k záměně nanobublin s částicemi či kapkami a tedy ke znehodnocení pokusu. Pro určení se používá metoda ustupujících kontaktních linií (receding contact lines, CLs). Při dotyku CLs s nanobublinou dojde k okamžitému kolapsu bubliny, zatímco u nanočástic a polymerních kapek dochází k velmi rychlému ukotvení/uvolnění kontaktní linie.

⁵ Mějme bublinu o objemu:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

Tuto bublinu rozdělme na dvě bubliny, bublinu A a satelitní bublinu B, která obsahuje n -tinu původního objemu s objemy

$$V_a = \frac{4}{3 \cdot n} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_a^3 \quad V_b = \frac{4 \cdot (n-1)}{3 \cdot n} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_b^3$$

Po úpravě nalezneme poloměry r_a a r_b jako:

$$r_a = r \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{n}} \quad r_b = r \cdot \sqrt[3]{\frac{n-1}{n}}$$

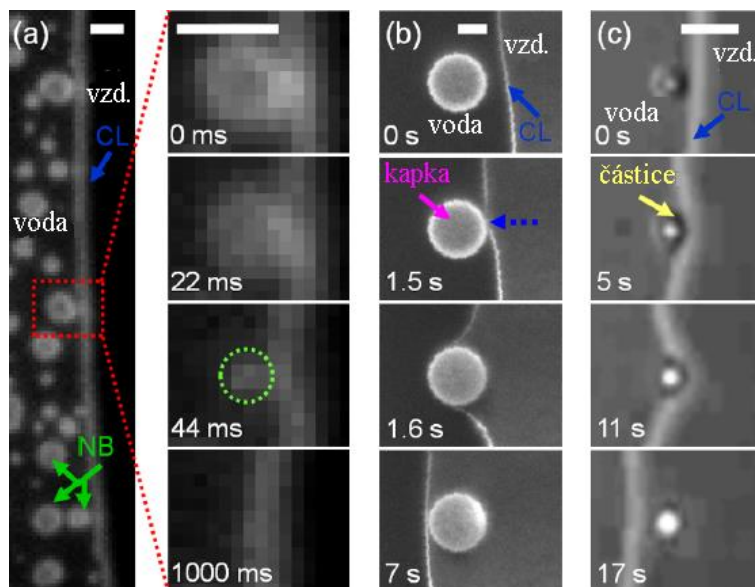
a následně povrchy kapek:

$$S_a = 4 \cdot \pi \cdot r_a^2 = 4 \cdot \pi \cdot \left(r \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{n}} \right)^2 \quad S_b = 4 \cdot \pi \cdot r_b^2 = 4 \cdot \pi \cdot \left(r \cdot \sqrt[3]{\frac{n-1}{n}} \right)^2$$

Celkový povrch obou kapek je tedy

$$S = S_a + S_b = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{(n-1)^{\frac{2}{3}} + 1}{n^{\frac{2}{3}}}$$

[26]



Obr. 7: působení kontaktní linie na a) povrchovou nanobublinu, b) polymerní kapku, c) pevnou částici [9]

Nanobubliny: V momentě, kdy se CLs dotkne bubliny, dojde k náhlému prudkému smrštění bubliny. Smrštění a následně vymizení bubliny je důkazem, že se jedná o nanobublinu. Nanobublina zaniká tak, že s přibližujícím se CLs klesá tloušťka vrstvy tekutého filmu, až dojde k jeho protržení, čímž dojde k vyrovnání tlaků v bublině. Jelikož kontaktní úhel nanobubliny (Obr. 9) je mnohem větší, než normální kontaktní úhel, vnitřní napětí nejsou v rovnováze, což iniciuje vznik kapilární síly, která působí na rozhraní a dochází ke smršťování bubliny. Z dynamiky kolapsu vyplývá, že povrchové nanobubliny jsou v metastabilním stavu. Bylo zjištěno, že rychlost kolapsu nanobublin přibližně probíhá dle mikroskopického modelu molekulární kinetické teorie. (Obr. 7a)

Polymerní kapky a pevné částice: Když je CLs daleko od kapky, rychlost ústupu je přibližně stejná ve všech směrech (uniformní), avšak když se dostane do blízkosti $1\ \mu\text{m}$ od kapky, CLs oblast blíže ke kapce se začne stahovat rychleji než ostatní oblasti. To ukazuje na možnost existence hydrofobního předchůdce filmu okolo kapky. Jakmile dojde ke střetu CLs a okraje kapky, dojde k velmi rychlému přemostění kapky. Jakmile se CLs přesune za kapku, zafixuje se zde a počká, než ji „dožene“ zbytek linie. (Obr. 7b)

Pevné částice (Obr. 7c): Jakmile CLs dosáhne částice, dojde k ukotvení linie v důsledku adhezivních kotvících sil. To má za následek výraznou deformaci linie a postupný nárůst kapilární síly. Jakmile kapilární síla převyší sílu kotvících, dojde k uvolnění a obnovení CLs. [9]

4.4 Termodynamická stabilita bublin

Z termodynamických zákonů platných v současnosti vyplývá, že nanobubliny by vůbec neměly existovat, respektive měly by existovat pouze po velmi krátký časový okamžik, než dojde k jejich rozpuštění. Experimenty však ukazují, že nanobubliny se v kapalině vyskytují a pokud se jedná o nanobubliny na určitém povrchu – povrchové nanobubliny, pak mohou dokonce existovat v řádu jednotek až stovek hodin, aniž by došlo k jejich rozpuštění. [4, 29]

Povrchové nanobubliny mají jisté vlastnosti, které odporují našemu očekávání. Kritický poloměr nanobublin je bodem nestabilní rovnováhy, kdežto nanobubliny se zdají být v rovnováze stabilní. Dalším problémem je tlak v bublině, neboť při dosazení do Laplace-Youngovy rovnice (2.6) je tlak v bublině roven přibližně 1 500 000 Pa, což je tlak přibližně 14,8 atmosfér a tudíž by se nanobubliny měly okamžitě rozpouštět, avšak to se, dle experimentů, neděje. Dále také poloměr bublin dle reálných parametrů je o řád větší, než změřený poloměr nanobublin a nakonec kontaktní úhel povrchových nanobublin je mnohem větší, než kontaktní úhel makroskopických kapek na stejném povrchu. [2, 3, 4]

Důvody uváděné jednotlivými vědci se různí, ať už se jedná o změnu proměnné v difuzi, či o změnu hodnoty povrchového napětí. Téměř všechny teorie se však shodují v informaci, že nanobubliny přítomné ve volné kapalině se prakticky vyskytovat po dlouhou dobu nemohou. Důvod proč mohou přežít pouze povrchové nanobubliny je ten, že jejich kruhové rozhraní je ukotveno k povrchu. [4, 29] Ukotvení je realizováno zachycením o nerovnosti povrchu (Obr. 8).



Obr. 8: Ukázka ukotvené nanobubliny [4]

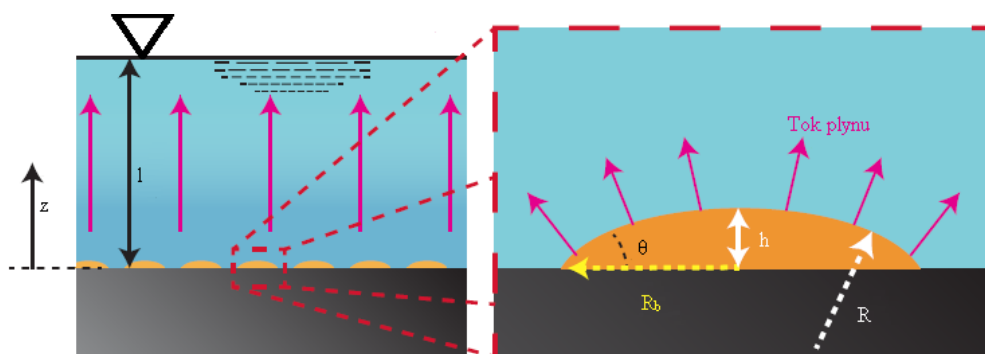
Ono ukotvení je pro nanobubliny klíčové. Kulová bublina ve volné kapalině funguje na principu: v bodě rovnováhy je mechanický i difuzní gradient roven nule. Jestliže však díky fluktuaci dojde ke zvětšení poloměru R bubliny, pak dojde ke zvětšení objemu bubliny, což implikuje snížení tlaku v bublině. To ovšem způsobí, že termodynamický gradient již není

nulový a do bubliny začne proudit plyn z okolní kapaliny, což má ovšem opět za následek zvětšení objemu a tedy do stavu rovnováhy se již bublina nevrátí a neustále zvětšuje svůj objem, dokud nevystoupí k hladině. Na stejném principu funguje bublina, jestliže dojde díky fluktuaci ke zmenšení poloměru. Rozdíl je v tom, že se zmenšujícím se objemem bude stále přítomen termodynamický gradient, který bude nutit plyn obsažený v bublině k přechodu do okolní kapaliny, bublina se bude neustále zmenšovat, až dojde k jejímu rozpuštění.

Pro ukotvenou bublinu však platí jiný princip. Jelikož je ukotvená, tak při zvětšení objemu bubliny dojde ke zmenšení poloměru křivosti R a tedy dojde k vyrovnání stavu a tento bod rovnováhy je stabilní.

Vysvětlení 1: Dalším vlivem působícím na bublinu je její povrchové napětí. V klasickém termodynamickém pojetí se povrchové napětí uvažuje jako konstantní. V případě přesycení kapaliny vzduchem však, dle pokusů, dochází ke snížení hodnoty povrchového napětí v závislosti na velikosti přesycení. Pokud je hodnota poměru přesycení ku nasycení rovna 3,6, pak je povrchové napětí rovno přibližně $0,026 \text{ Nm}^{-1}$ a tedy kritický poloměr má hodnotu 200 nm. [4]

Vysvětlení 2: U předchozího vysvětlení bylo třeba zahrnout změny oproti klasickému pojetí, jako je například změna povrchového napětí s velikostí přesycení. V jiném vysvětlení se však můžeme vyvarovat přijímání jakýchkoliv předpokladů kromě faktu, že bublina je opět ukotvená. Je uvedeno, že pokud budeme uvažovat kvazistatickou difuzi, pak při jakékoliv změně koncentrace rozpuštěného plynu v horizontální ose je pro $l > 5 \times d_{\text{bub}}$ difuze plynu přes kapalnou vrstvu řízena jednodimenzionální rovnicí difuze (2.2), kde $z \in (0; l)$



Obr. 9: Ukázka povrchové nanobubliny a jejích rozměrů [29]

Při dosazení hodnot do rovnice difuze vychází hodnota: $\frac{l^2}{D} \approx 10^5$ s což souhlasí s provedenými experimenty [30]. Rozdíl oproti Attardovu vysvětlení [4] spočívá ve využití vzdálenosti l ode dna k hladině jako relevantní délkové míry místo užití poloměru R bubliny. Užití poloměru by bylo oprávněné při výpočtu volné bubliny v nekonečném prostoru. V případě povrchových nanobublin je však nutné si uvědomit, že plyn systém neopustí do té doby, dokud nevystoupá do atmosféry a tudíž je potřeba brát na l ohled, jelikož je to vzdálenost, kterou musí plyn k atmosféře urazit. Uvažujme pokus, kdy je do uzavřené nádoby vpuštěna bublina. Kapalina se tudíž stane přesycenou díky plynu, který částečně unikl z bubliny, nastává rovnováha a bublina se nerozpustí. Jakmile nádobu otevřeme, tak plyn již může unikat do atmosféry a plyn z bubliny může dále unikat. Děje se tak však pomalu, díky „efektu dopravní zácpy“, kdy si jednotlivé bubliny vzájemně brání v pohybu. S klesáním vnitřního úhlu θ také dochází ke snižování vnitřního tlaku v bublině, což dále zpomaluje difuzi a prodlužuje život nanobublin.

Z numerického řešení dále vyplývá, že transport plynu směrem ven z bubliny je limitován difuzní hodnotou plynu, jenž musí projít přes vodu ve velké vzdálenosti od bubliny. To zapříčiňuje téměř plochý koncentrační profil v okolí bubliny, přes který je difuzní proud plynu velmi malý. Je uvedeno, že je potřeba přibližně 2-3 hodin na to, aby informace o vlivu okolního vzduchu doputovala k bublině a ta se mohla začít rozpouštět. V průběhu prvních 3 hodin se tedy bublina téměř nezmenšuje, jelikož koncentrační gradient je téměř nulový.

Také je dokázáno, že c je nezávislé na σ a je závislé pouze na D a l . Tato úvaha není intuitivní, jelikož povrchové napětí je řídicí silou při rozpouštění bubliny. Povrchové napětí zvyšuje Laplaceův tlak, čímž zvyšuje sílu, která zapříčiňuje rozpouštění, avšak zároveň také zvyšuje množství plynu v bublině. Větší množství plynu v bublině poté potřebuje pro vyrovnání koncentračního rozdílu větší tok. Jelikož jsou obě tyto vlastnosti závislé na σ lineárně, vyruší se. [29]

Dle vysvětlení 1, kdy je uvažováno ukotvení nanobubliny a změna povrchového napětí v závislosti na přesycení je tedy dokonce možné, že nanobubliny jsou ve stabilní rovnováze, což by i vyhovovalo úkazu v [21], kde autoři tvrdí, že nanobubliny tvořené dusíkem mají životnost 14 dnů. Zde je ovšem nutné upozornit, že autoři [21] zároveň tvrdí, že rovnováha je nestabilní a dochází k velmi pomalé difuzi. Jejich vysvětlení se opírá o fakt,

že byly zjištěny změny v délce vodíkové vazby. Došlo k jejímu zkrácení z 0,295 nm na 0,273 nm a autoři mají za to, že ono zkrácení způsobilo zdvojnásobení hodnoty povrchového napětí a tedy dle nich toto povrchové napětí udržuje plyn v bublině a velmi snižuje rychlost difuze. Došli tedy k přesně opačnému výsledku než ve vysvětlení 1. V podstatě stejná doba života byla zaznamenána a reportována i v článku [27], kde bylo dosaženo pro nanobubliny naplněné kyslíkem 3 až 15 dnů života. Pro nanobubliny tvořené vzduchem pak přibližně jednu hodinu, což ovšem příliš neodpovídá výpočtům Lohse a Weijse [29]. Experimentálně změřenou délku života v rozsahu od 1 do cca 24 hodin uvádějí i autoři v článku [30].

Ukazuje se, že typ použitého plynu a okolního prostředí má na dobu života nanobublin velký vliv. Platí přímá úměra čím vyšší hodnota zeta potenciálu, tím delší doba života nanobubliny. Vysokou hodnotu zeta potenciálu má například kyslík, což je výhodné například pro pěstování rostlin. Kyslíkové bubliny by totiž měly v kapalině vydržet mnohem déle, než například vzduchové bubliny a růst rostlin by se měl zlepšit. Rozdílnost výsledků je možno vysvětlit různými metodami měření a vyhodnocování výsledků a vždy zde existuje možnost kontaminace vody nanočásticemi. Jak upozorňuje ve své práci [8], je třeba věnovat zvýšenou pozornost přípravě povrchu, jinak zde existuje možnost znehodnocení výsledků částicemi přítomnými na povrchu.

5 Využití kavitace, nano a mikrobublin v praxi

Hlavním smyslem pro co nejefektivnější vytváření nano a mikrobublin je možnost jejich využití v praxi. Dále je popsáno využití ve vodní dezinfekci, flotaci uhlí, použití bublin jako maziva a nakonec ovlivnění růstu rostlin.

5.1 Vodní dezinfekce

Dezinfekce je proces hubení mikrobů, v případě hydrodynamické kavitace, za pomoci narušování stěn mikrobů tlakovou vlnou. Při kavitaci dochází k implozi, což s sebou také přináší prudkou tlakovou změnu, která Doprovodným jevem je možnost vytváření ozonových nano a mikrobublin. Ozon samotný má velkou oxidační schopnost. Ozonové nano a mikrobubliny kromě samotného účinku kavitace využívají také svou schopnost tvoření vysoce reaktivních volných OH radikálů, které mají dezinfekční účinky.

Z pokusů vyplývá, že hydrodynamická kavitace je vhodná pro dezinfekci velkých objemů a pro velmi znečištěnou vodu. Pro dezinfekci malých objemů není vhodná, jelikož obsah nečistot je malý a proto je malá šance, že kavitace nastane v dostatečné blízkosti od mikrobu. Z pokusů nadále vyplývá, že hydrodynamická kavitace je velmi levná metoda, avšak stále dražší, než běžně používaná chlorace a ozonace. [1, 11, 12]

5.2 Pěnová flotace

Pěnová flotace se využívá k čištění uhlí. Princip metody je takový, že využívá rozdílnosti jednotlivých materiálů v hydrofobnosti povrchu. Do rozemleté horniny smíšené s vodou jsou vháněny bubliny. Na bubliny se navážou hydrofobní materiály a minerály. Bubliny následně stoupají k povrchu a tvoří pěnu. Tuto pěnu je poté možno sbírat z povrchu a dále zpracovávat. Nejúčinnější a cenově nejvýhodnější je tímto způsobem vhodné zpracovávat částice o velikosti 50 – 600 μm pro uhlí a 10 – 100 μm pro minerály.

Nanobubliny generované na pevných površích též fungují jako sekundární sběrače (collector), čímž zvyšují pravděpodobnost adheze a snižují potřebu hydrofobně působících chemických činidel. Z pokusu je zřejmé, že při použití nanobublin flotační návrat (flotation recovery) vzrostl o 5 až 10 %. Dále bylo zjištěno, že 90% spalitelný návrat (combustion recovery) byl získán při 0,5 kg/t sběrače bez použití nanobublin, kdežto při

použití nanobublin byl 90% spalitelný návrat získán již při 0,25 kg/t sběrače. Důvod je uveden v předchozím odstavci. Tato výhoda je obzvláště důležitá pro velmi drobné (ultrafine) a oxidované uhlí, kde by jinak bylo zapotřebí použít velké množství činidel.

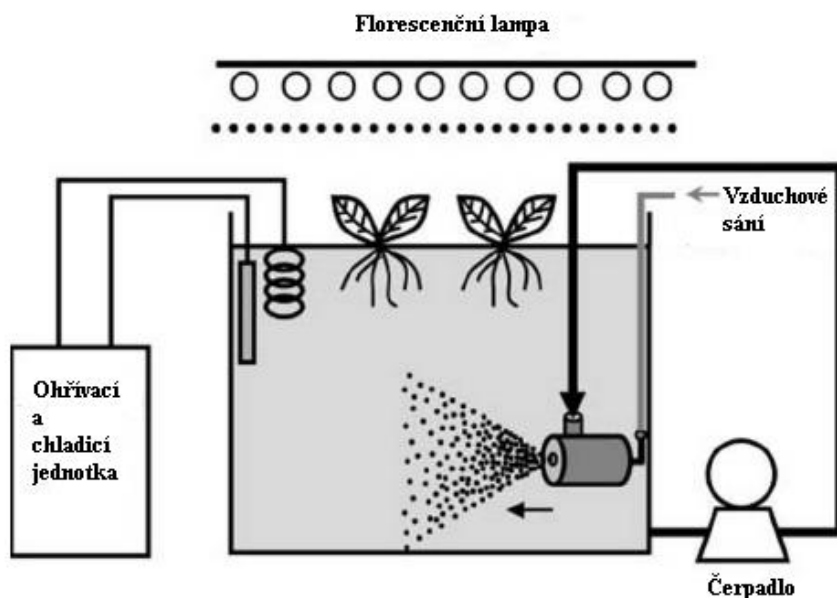
Separční účinnost je definována jako rozdíl mezi spalitelným návratem a popelovým návratem. Z experimentu je patrné, že separční účinnost pěnové flotace je při použití nanobublin téměř vždy vyšší. Také je zjevné, že optimální množství sběrače je při použití nanobublin poloviční. Zatím se ve většině případů využívá olejového sběrače, který sice zvyšuje hydrofobicitu uhlí a šanci na adhezi, avšak zároveň také zvyšuje výrobní náklady a snižuje separční účinnost. Ukazuje se tedy, že využití nanobublin by bylo mnohem výhodnější. [25]

5.3 Mazání a tření

Spekuluje se rovněž o využití mikro a nanobublin v souvislosti s mazáním a třením. Nepanuje však shoda mezi výsledky pokusů a teorií jednotlivých autorů. Existuje teorie, že přítomnost nanobublin snižuje tření, jelikož vytvořené povrchové nanobubliny fungují jako polštáře, po kterých mohou materiály klouzat [18]. Výsledky experimentu provedeného Maalim [17] však uvádí přesný opak. Dle jeho experimentu nanobubliny tření mezi materiály zvyšují. [17] Pro nalezení pravdy tedy ještě bude zapotřebí dalšího výzkumu.

5.4 Zlepšení růstu rostlin

U metody pěstování rostlin ve vodě bez přítomnosti zeminy, lépe známé jako hydroponie (Obr. 10), bylo zaznamenáno výrazné zlepšení v růstu rostliny - salátu při využití mikrobublin.



Obr. 10: Princip hydroponie [22]

Byl proveden pokus, při kterém byla polovina počtu rostlin provzdušňována makrobublinami a druhá polovina počtu rostlin mikrobublinami. Po provedení experimentu byly rostliny změřeny a zváženy. Bylo zjištěno, že polovina rostlin provzdušňována mikrobublinami měla $2,1 \times$ větší hmotnost čerstvých listů a $1,7 \times$ větší hmotnost sušených listů než první polovina rostlin. Také byl zaznamenán rozdíl v množství, délce a šířce, a to opět ve prospěch mikrobublin (Obr. 11). Změna v růstu byla způsobena větším povrchem mikrobublin oproti makrobublinám. Mikrobubliny se také snáze a lépe držely u kořenů a tak mohly doplňovat kyslík přímo do kořene rostliny. Existuje zde také spekulace, že negativně nabitě mikrobubliny přitahovaly vyživující soli, které mají pozitivní náboj, a tedy mohla lépe probíhat výživa rostlin. [22]



Obr. 11: Změna ve vzrůstu salátu, vlevo užití makrobublin, vpravo mikrobublin [22]

6 Experiment – možnosti využití laserového paprsku a fotoaparátu pro zachycení nano a mikrobublin

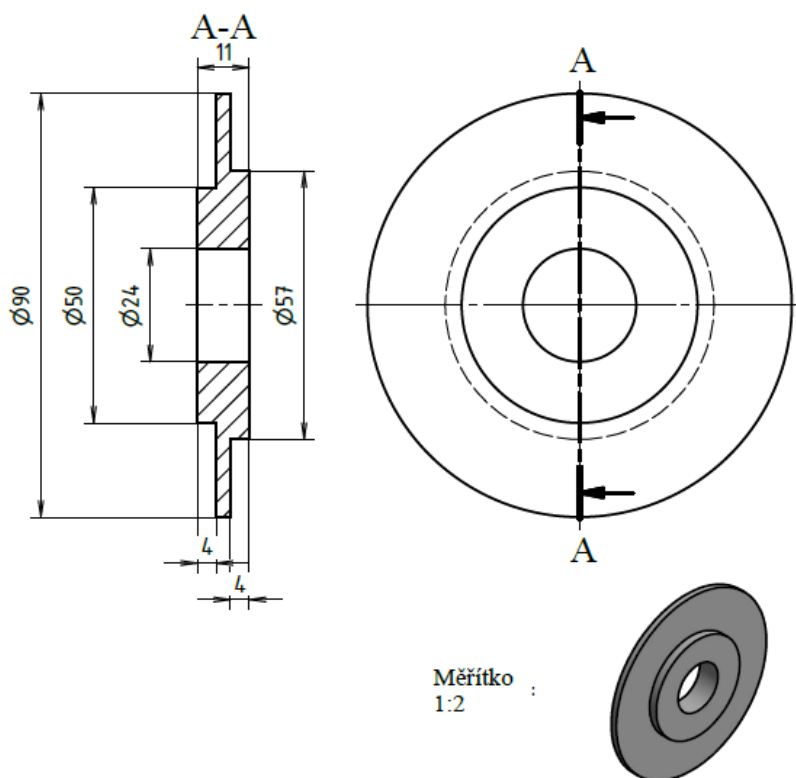
Experiment probíhal v těžké laboratoři odboru fluidního inženýrství, cílem bylo zjistit, zda pomocí laseru je možno dobře zachytit nano a mikrobubliny na fotografii.

6.1 Metoda pokusu

V rámci pokusu byla prostřednictvím průchodu kapaliny skrz otvor (Obr. 12) vytvořena hydrodynamická kavitace. Následně byla za pomoci laserové stěny nasvícována jádra a bubliny obsažené ve vodě a fotoaparátem značky Nikon byly snímány fotografie. Laserového paprsku bylo využito pro jeho koherentnost⁶ a monochromaticnost⁷. Rozdíl oproti světlu ze žárovky je v tom, že laserový paprsek je velmi úzký a je přesně směřován, což také znamená, že světelná energie bude v daném prostoru vysoce koncentrovaná [28]. Při dopadu laserového paprsku na překážku pak dojde k odrazu od překážky a tedy k jejímu nasvícení. Byl použit laser Verdi G2 o maximálním výkonu 2 W. Laserový paprsek byl upravován kolimátorem s názvem π -shaper, který upravuje záření paprsku a umožňuje jeho lepší využití. Následně paprsek procházel sadou čoček a zrcadel, kde se usměrňoval a upravoval.

⁶ Koherentní vlnění – „Koherentní jsou světelná vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se s časem nemění.“ [16, str. 92]

⁷ Monochromaticnost – Světelné vlnění určité frekvence. [16, str. 14]



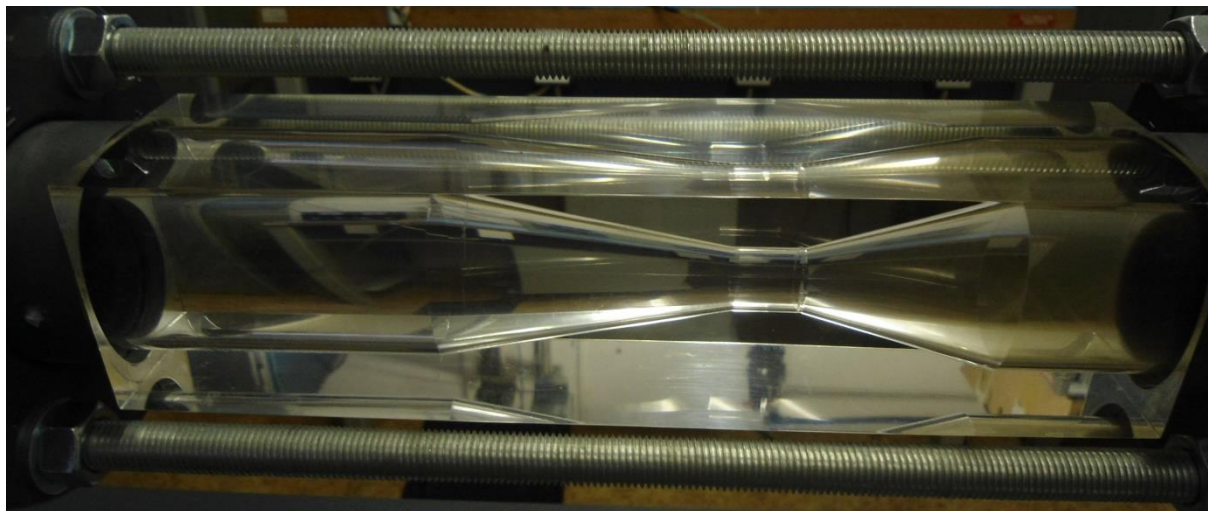
Obr. 12: Rozměry otvoru [13]

6.2 Výsledky pokusu

Tento pokus nepřinesl kýžené výsledky. Mezi hlavní příčiny lze zařadit špatné optické podmínky, kdy docházelo k odrazům od průhledné trubky. Toto bylo způsobeno jejím kruhovým průřezem. Jelikož nebylo možné nastavit rovinu laserového paprsku přesně doprostřed trubky, vznikaly odrazy a lomy světla, které znemožňovaly téměř jakékoliv zachycení fotoaparátem.

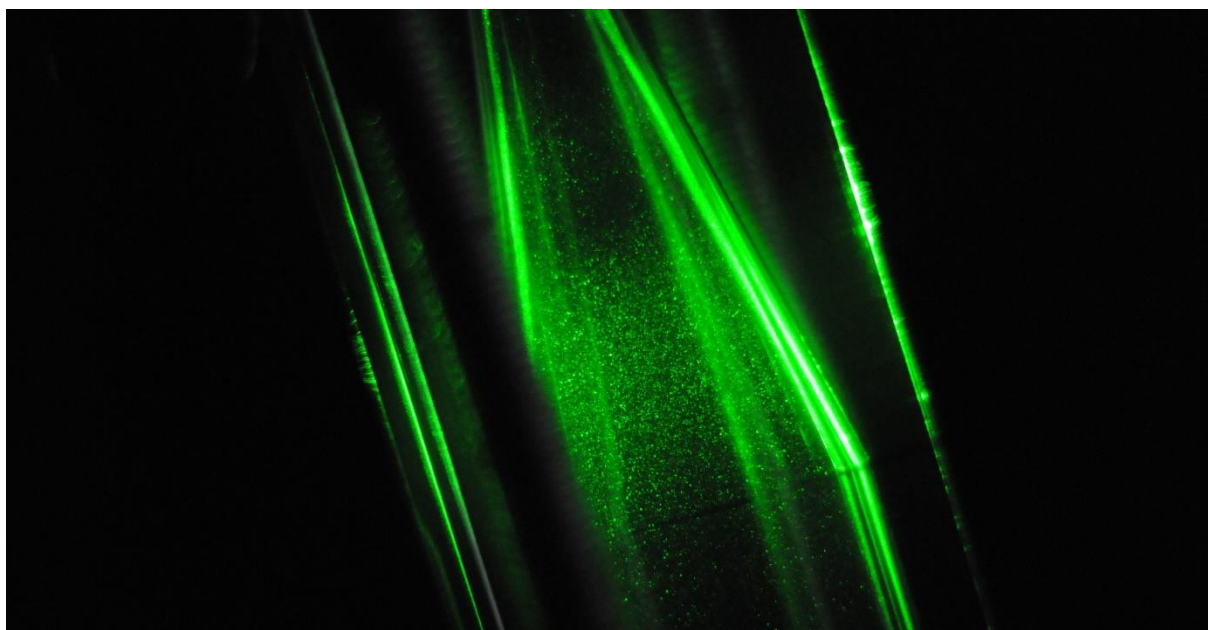
Dalším problémem byla nedostatečná intenzita záření laserového paprsku. Paprsek nebyl schopen vytvořit optimální kontrastní prostředí pro zhotovení fotografie. Tento problém byl stejně tak způsoben nemožností zajistit dostatečně tmavé okolní prostředí, které by relativně zvýšilo intenzitu záření laseru.

Následoval tedy pokus číslo dvě, který se odehrával v laboratoři kavitace. Zde již nebyla zkoumána kavitace v uspořádání dle obrázku (Obr. 12), ale bylo využito speciálně upravené Venturiho dýzy (Obr. 13).

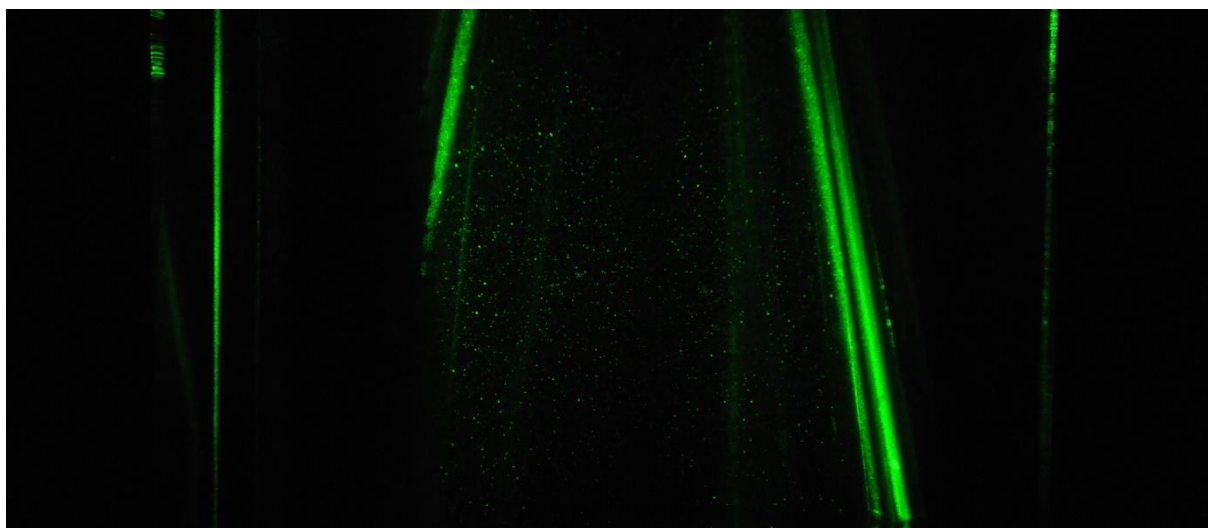


Obr. 13: Upravená Venturiho dýza

Upravení spočívalo ve využití broušeného skleněného obalu tvaru kvádru, jehož součástí byla Venturiho dýza. Kolmé stěny kvádru umožňovaly lepší průchod laserového paprsku a zajistily ideální prostředí pro pořízení fotografií. Další výhodou, kterou laboratoř kavitace poskytovala, byly mnohem lepší světelné podmínky. V laboratoři bylo daleko méně světla, než v otevřeném prostoru při předchozím pokusu. Na počátku pokusu byla nejprve vyfocena trubice prosvícená laserem před působením kavitace tak, jak je vidět na obrázku (Obr. 14). Následně bylo připojeno čerpadlo, které zajistilo vytvoření kavitace. Po 5 minutách bylo čerpadlo vypnuto a znovu došlo k vytvoření fotek kavitačních jader a bublin (Obr. 15).

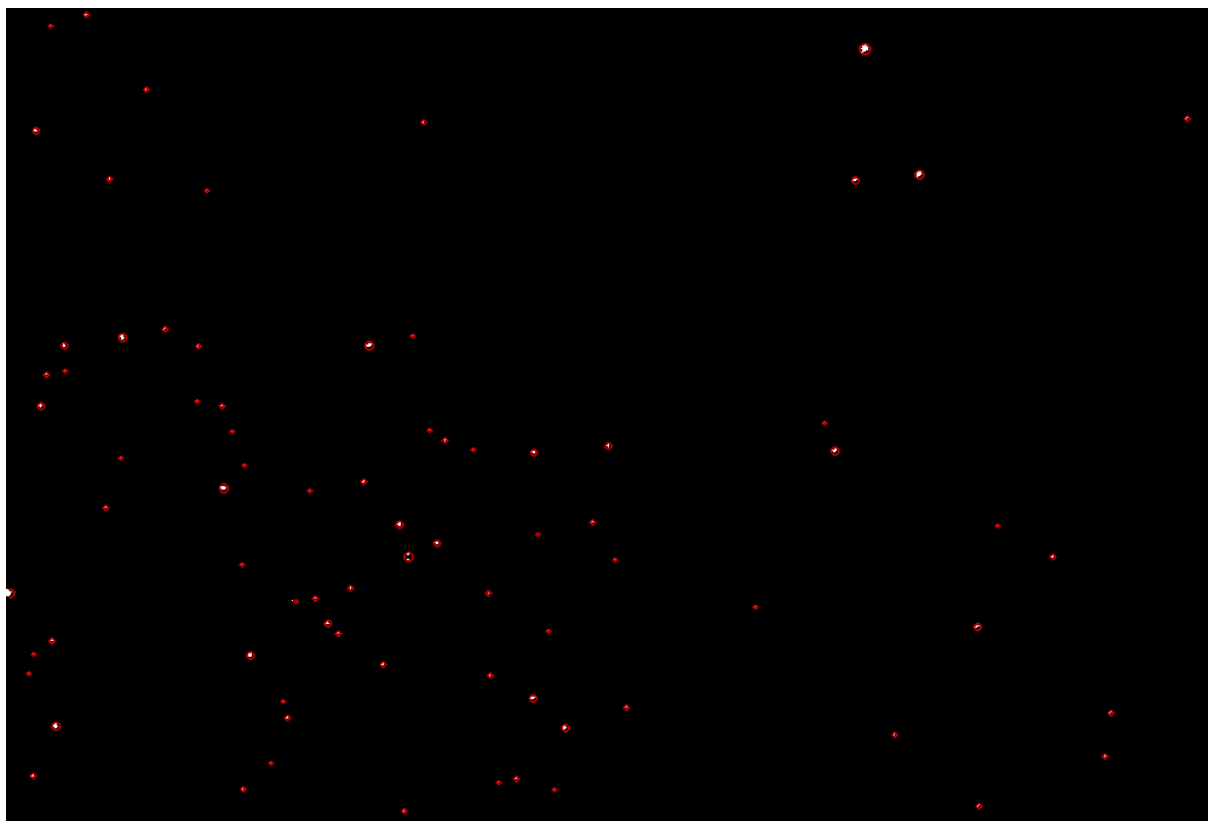


Obr. 14: Kavitační jádra



Obr. 15: Množství jader po kavitaci

Obrázky byly zpracovány pomocí počítačové grafické analýzy, kdy na určité oblasti došlo k označení "dostatečně světlých" bodů tak, jak je vidět na obrázku (Obr. 16).



Obr. 16: grafická analýza

Světlých bodů, čili kavitačních jader a mikrobublin bylo programově sečteno 78, nicméně program od sebe nedokázal odlišit bubliny, které dělila velmi malá vzdálenost. Ve skutečnosti bylo tedy částic a bublin napočítáno 79.

6.3 Vyhodnocení pokusu

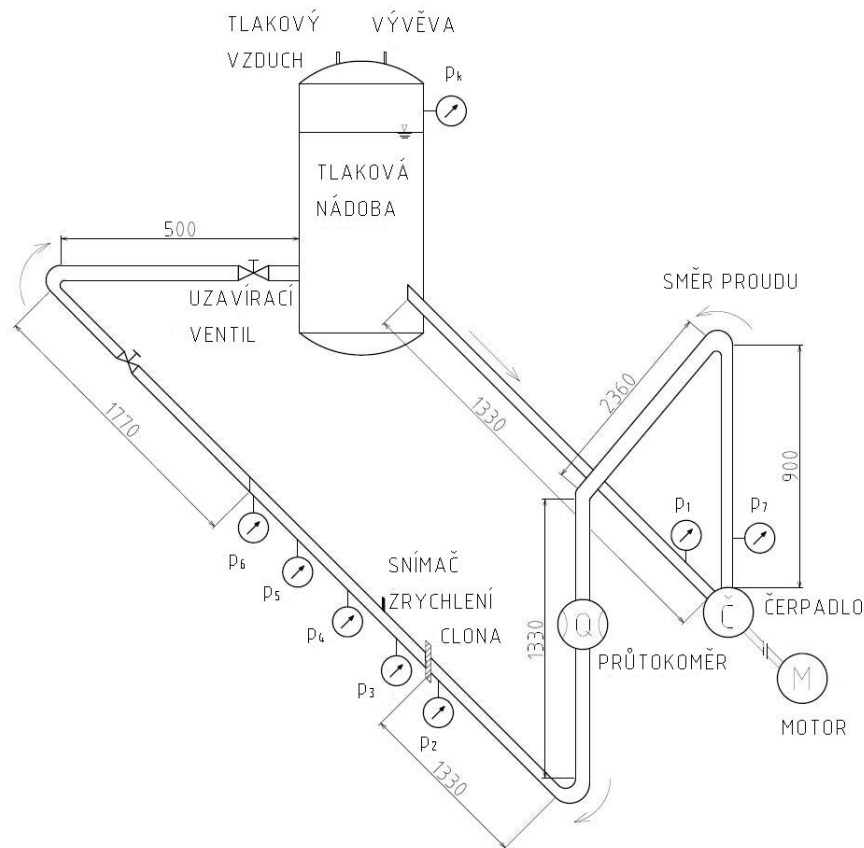
Zdá se, že nasvicování jader a bublin laserovou stěnou s následným vyhodnocením pomocí softwaru se jeví jako jedna z možností, jak analyzovat počet kavitačních jader v kapalině, nicméně pro zkoumání bublin se příliš nehodí, jelikož nelze rozlišit mezi bublinou a částicí. Dále bylo zjištěno, že pro snímání bublin pomocí fotoaparátu je zapotřebí použití laseru se silnějším výkonem. Nutností je rovněž zajištění dostatečně tmavého okolního prostředí. I při perfektních podmínkách však tímto způsobem s vysokou pravděpodobností nepůjdou zachytit nanobubliny. Jako vhodnější řešení se tedy jeví využití laserového paprsku a diod tak, jak je popsáno v práci Tesaře [26]. Diody jsou rozmístěné okolo trubice pod vhodným úhlem, a tedy snímají selektivně pouze paprsky odražené od bublin dané velikosti.

7 Experiment – určení množství bublin a hydraulických ztrát při připojení překážky do okruhu

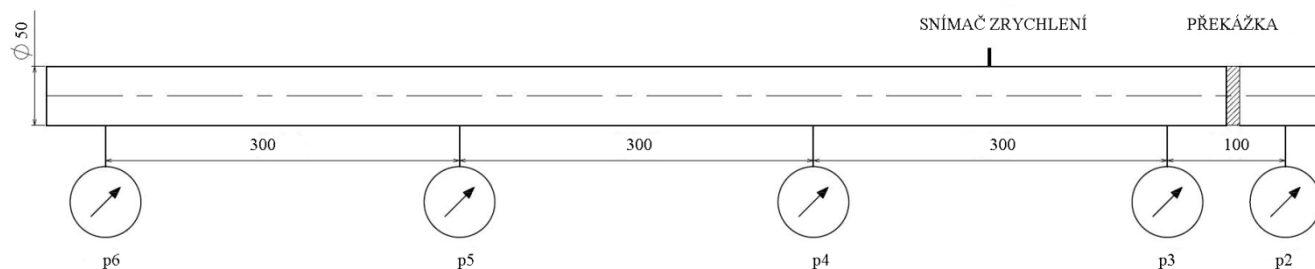
Experiment byl proveden v těžké laboratoři odboru fluidního inženýrství, cílem bylo zjistit množství a velikost bublin a velikost ztrát při připojení překážky do okruhu.

7.1 Experimentální okruh

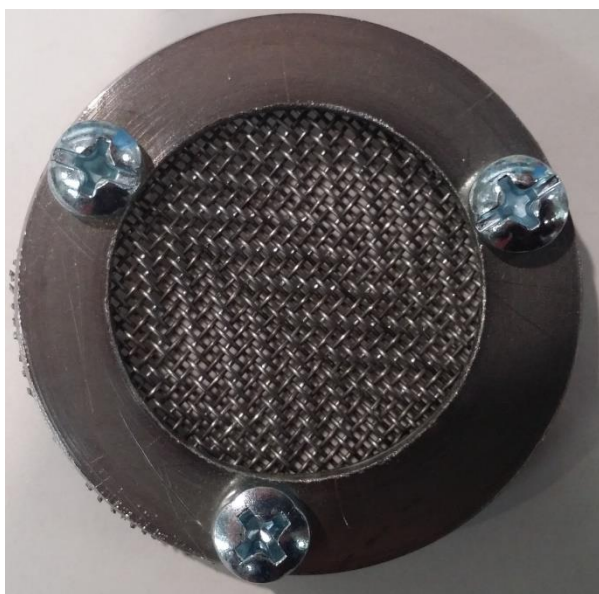
V okruhu s rozměry, jak je uvedeno na obrázku (Obr. 17) se nacházela, mimo jiné, také průhledná plexisklová trubice s přírubou (Obr. 18).



Obr. 17: Okruh [13]



Obr. 18: plexisklová trubice [13]



Obr. 19: Sítka

V pokusu 1 na přetlakovou a v pokusu 2 na podtlakovou stranu příruby bylo namontováno ocelové sítko s průměrem 30 mm (Obr. 19). Toto sítko mělo 630 čtvercových ok o délce strany 0,65 mm rozdělených drátem s průměrem 0,4 mm. V pokusu 3 byla namontována obě dvě sítka zároveň a meziprostor byl vyplněn měděnou drátěnkou.

Při pokusu 1 a 2 probíhal experiment při tlakové nádobě otevřené do atmosférického tlaku, při pokusu 3 byla tlaková nádoba uzavřena a pomocí vývěvy byl tlak snížen o cca 60 kPa pod hodnotu atmosférického tlaku pro usnadnění vzniku kavitace. Cílem experimentu bylo:

- 1) zjistit, zda při použití sítka bude generovaných bublin více či méně, než bez jeho využití
- 2) zjistit, jak bude kavitační číslo záviset na ztrátovém součiniteli.

K zachycení kavitace na fotografie bylo použito vysokorychlostní kamery značky Baumer s objektivem 12-36 mm 1:2:8. Tato kamera měla snímací frekvenci 256,5 obrázků za sekundu, přičemž snímací čas byl 10 sekund. V pokusu 1 a 2 byl jako počátek měření

zvolen průtok 0,6 litrů za sekundu, což odpovídalo přibližně 300 otáčkám za minutu. Postupovalo se s krokem 0,3 l/s až do mezní hodnoty otáček čerpadla, které činily 2800 min^{-1} .

V pokusu 3 byl jako počátek měření rovněž zvolen průtok 0,6 l/s, avšak bylo zjištěno, že hodnota průtoku není stabilní a krok 0,3 l/s je příliš velký a tedy byl volen krok 150 min^{-1} .

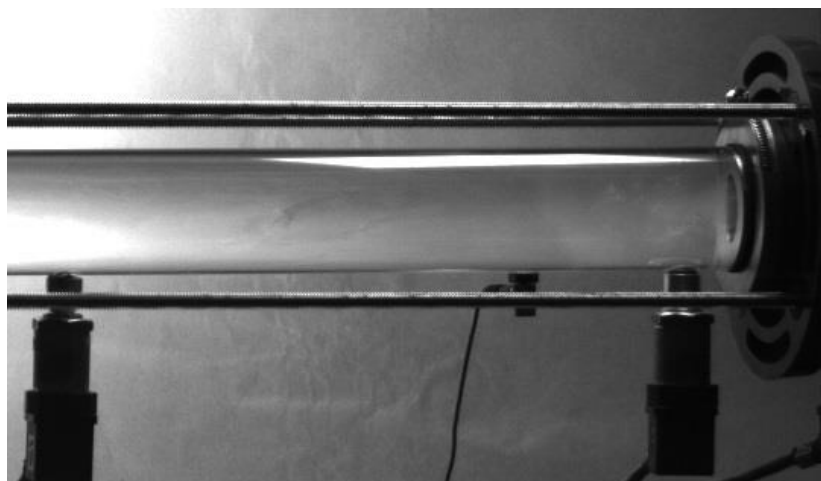
Po každém kroku bylo provedeno focení vysokorychlostní kamerou a zároveň změření a uložení měřených veličin (p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , p_6 , p_7 , p_k , Q , n). Změření bylo provedeno pomocí softwaru LabView, který zaznamenal 30 000 hodnot za 15 sekund pro každou veličinu. Zpracování hodnot a vytvoření grafů bylo provedeno v softwaru Microsoft Excel.

7.2 Výsledky experimentu

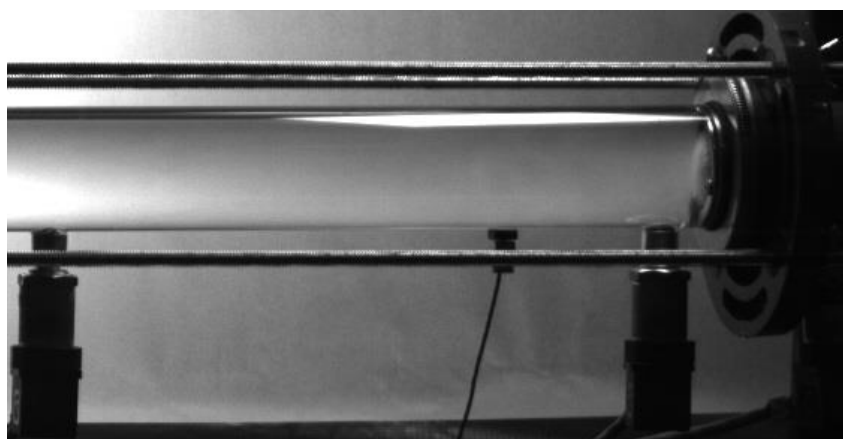
Aby bylo možné jednotlivá sestavení porovnat, byla zvolena přibližná hodnota kavitačního čísla $\sigma_v = 0,55$. Při použití sítka na přetlakové straně příruby bylo zachyceno foto (Obr. 21), které bylo porovnáno s fotem (Obr. 20) kavitace bez sítka. Stejným způsobem bylo postupováno i při použití sítka na podtlakové straně (Obr. 22) a také při použití obou dvou sítok s meziprostorem vyplněným měděnou drátěnkou (Obr. 23).



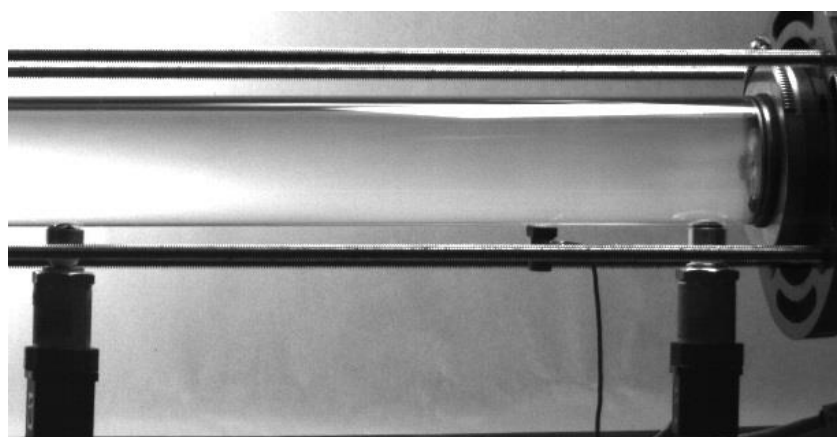
Obr. 20: Kavítace při průchodu otvorem z Obr. 12, $\sigma_v = 0,55$ [13]



Obr. 21: Kavitace při sítku na přetlakové straně, $\sigma_v = 0,60$



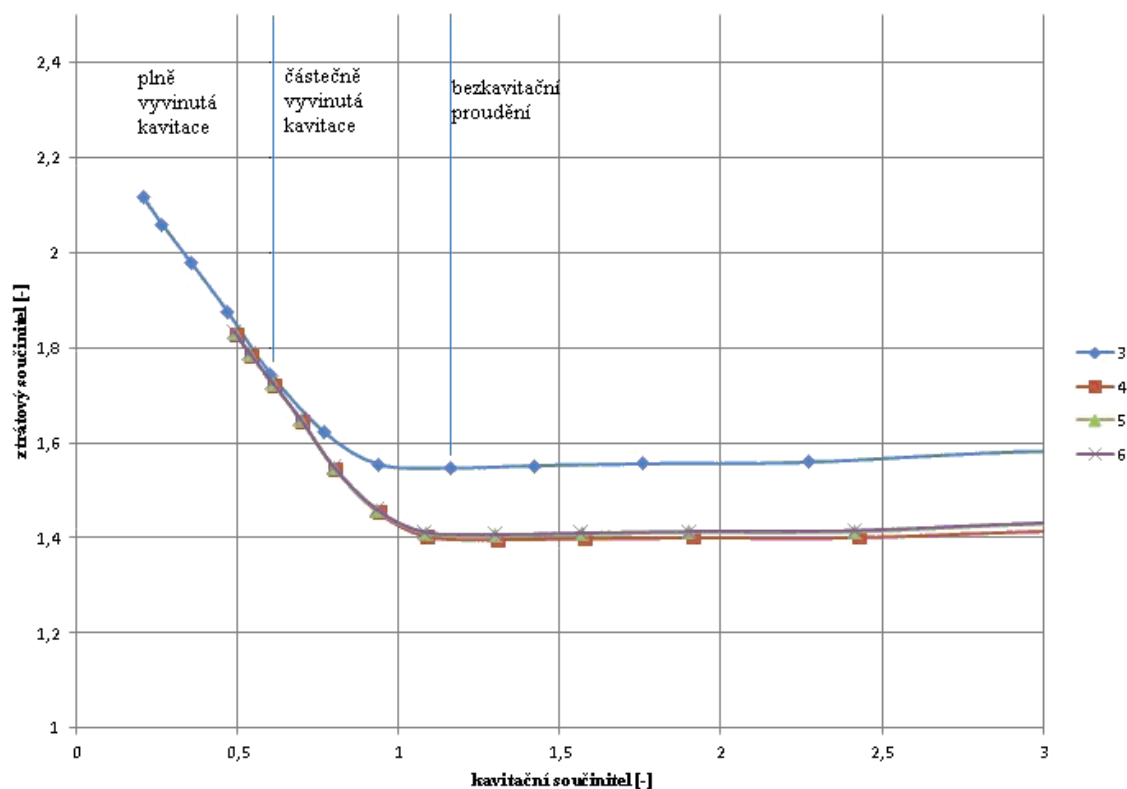
Obr. 22: Kavitace při sítku na podtlakové straně, $\sigma_v = 0,55$



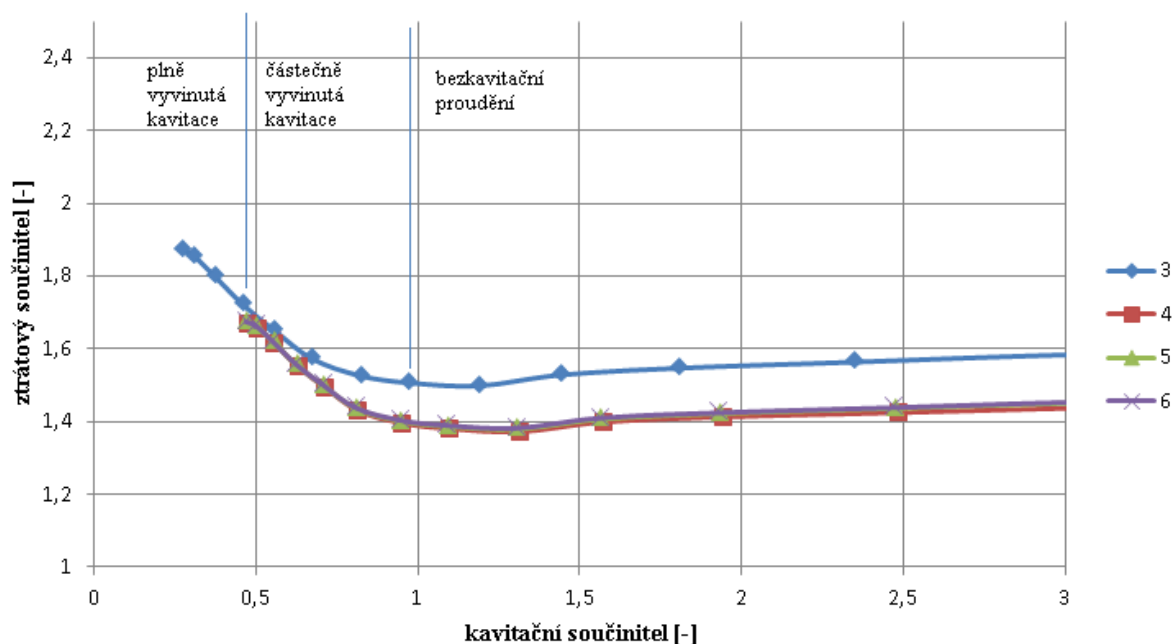
Obr. 23: Kavitace při sítku na obou stranách s prostorem vyplněným měděnou drátěnkou

Vyhodnocení ztrát při přetlakovém a podtlakovém připojení sítka vyústilo v grafy (Obr. 24) a (Obr. 25). Vyhodnocení ztrát při připojení obou sítok a drátěnky nebylo

provedeno, jelikož nebylo možné vypočítat ani odhadnout průtočnou plochu a tedy nebylo možné zjistit rychlost proudění.



Obr. 24: Graf závislosti ztrátového součinitele na kavitacním čísle - přetlak

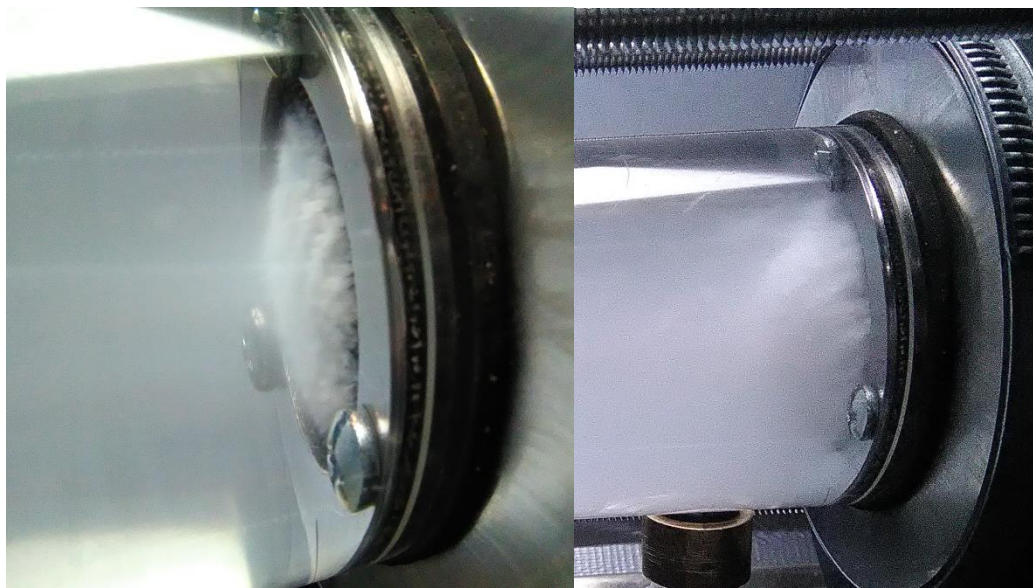


Obr. 25: Graf závislosti ztrátového součinitele na kavitacním čísle – podtlak

Čísla 3 až 6 určují tlakový senzor, ke kterému se křivka vztahuje.

7.3 Vyhodnocení experimentu

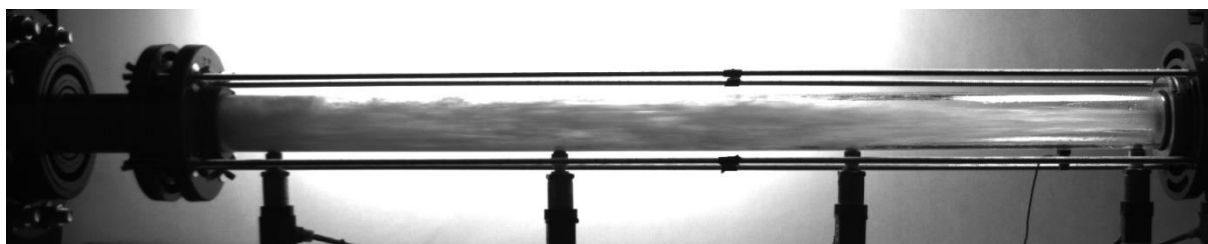
Zdá se, že množství malých bublin bylo mnohonásobně větší při použití sítka. Také bylo zaznamenáno vytvoření bublinového polštáře za sítkem při jeho namontování na podtlakovou stranu. Je rovněž předpokládán vznik polštáře na přetlakové straně, nicméně toto se nepovedlo na fotografii zachytit.



Obr. 26: Bublínkový polštář při kavitačním součiniteli a) $\sigma = 0,67$, b) $\sigma = 0,31$

Nejprve byl tento polštář považován za nečistoty v potrubí, nicméně tato hypotéza byla vyvrácena faktem, že při natlakování vody v potrubí na 202 kPa⁸ již k vytvoření polštáře nedošlo. Jak lze vidět na obrázku (Obr. 26), s rostoucím průtokem, to znamená se snižujícím se kavitačním součinitelem, rostla rovněž výška polštáře a také hustota mléčné mlhy. Mléčnou mlhu tvoří bubliny velmi malých rozměrů. Zdá se tedy, že sítko splňuje náš požadavek na tvoření velkého množství velmi malých bublin. Když byl, v rámci pozorování hranice možností, absolutní tlak v potrubí snížen na 20 kPa, pak při otáčkách 2800 min⁻¹ došlo k superkavitaci, avšak vlivem sítka byla superkavitace roztržštěná (Obr. 27). Pro porovnání je vložen obrázek superkavitace při sestavení dle obrázku (Obr. 12).

⁸ Při dostatečném zvýšení tlaku v potrubí již nedochází k vytvoření kavitačních bublin.

**Obr. 27: Roztříštěná superkavitace****Obr. 28: Superkavitace při sestavení dle Obr. 12 [13]**

Z grafů (Obr. 24) a (Obr. 25) je patrné, že nejvyšší ztrátový součinitel při daném kavitacním součiniteli je na třetím tlakovém senzoru. Tento výsledek je očekávaný, neboť mezi druhým a třetím senzorem dochází k největší tlakové změně. Naopak křivky 4 a 6 mají pořadí obrácené, než jaké bylo předpokládáno. Se zvětšující se vzdáleností od překážky, která tvoří kavitaci, je očekáváno postupné zvýšení tlaku a tedy tlakový rozdíl senzoru 2 a 6 by měl být menší, než tlakový rozdíl senzorů 2 a 4. Při pokusu byl ovšem naměřen opak. Jako možné vysvětlení se nabízela záměna označení senzorů, nicméně toto podezření bylo okamžitě vyvráceno testem vypojení senzorů, kdy docházelo k postupnému vypínání jednotlivých senzorů a následné kontrole v softwaru.

Ztrátový součinitel byl menší při použití sítky na podtlakové straně příruby, než při použití na přetlakové straně příruby, avšak byl stále větší, než při použití příruby bez sítky. To je možné si vysvětlit tak, že průtok přes sítko na podtlakové straně je pozvolnější, nejprve dojde k průchodu přes překážku dle obrázku (Obr. 12) a až pak k protlačení přes sítko, přičemž je zde také možnost, že při průchodu přes překážku již vznikne kavitace a tedy část kapaliny se přemění v páru. Pára pak snáze prochází otvory v sítku, a tedy ztráty jsou nižší. U sítky na přetlakové straně musí voda překonávat dvě překážky najednou a opět zde existuje možnost, že dochází k průchodu kapaliny a nikoliv páry a z toho důvodu je tedy ztrátový součinitel vyšší.

8 Závěr

Na začátku bakalářské práce jsou popsány základní pojmy, které mají za úkol usnadnit orientaci v následujících kapitolách a podat nezbytné definice nutné pro pochopení navazujícího textu práce.

Poté je popsán princip kavitace, přičemž větší pozornost je věnována kavitačním jádrům a difuzi plynu, což jsou témata pro nano a mikrobubliny velmi důležitá. Je ukázáno, že difuze plynu v klasickém pojetí neurčuje dobu života nanobubliny.

V následující kapitole je řešena problematika existence a rozeznávání mikro a nanobublin stejně jako jejich termodynamická stabilita a možnosti jejich generování. Názory vědců ohledně možnosti stability nanobublin se stále liší. Již bylo prokázáno, že povrchové nanobubliny existovat mohou, ať už to je díky jejich ukotvení, změně proměnné v difuzi či změně hodnoty povrchového napětí se vzrůstajícím přesycením. Nanobubliny ve volné kapalině by dle termodynamických zákonů existovat neměly, ale zdá se, že pokusy ukazují opak. Pro rozeznání nanobublin je možno využít metodu CLs, avšak cenou za její využití je destrukce nanobubliny. Jedná se však o spolehlivou metodu se zaručeným výsledkem. V práci je popsáno množství metod, kterými lze nano a mikrobubliny generovat, bohužel prozatím nebyl proveden pokus, který by určil, která metoda je energeticky nejvýhodnější.

Samostatnou kapitolou je využití bublin v praxi. V práci popsané využití pro dezinfekci, flotaci uhlí či mazání a tření je pouze výběrem z velmi širokého spektra dalších možností použití.

V posledních dvou kapitolách je popsáno provedení experimentů. V obou experimentech bylo využito vytvoření hydrodynamické kavitace vznikající v důsledku zúžení průřezu. Prvním experimentem se bohužel nepovedlo potvrdit nebo vyvrátit existenci nano a mikrobublin. Bylo zjištěno, že popsaná metoda funguje dobře pro zjištění počtu kavitačních jader, nicméně ke zjišťování počtu a velikosti bublin se nehodí. Ve druhém experimentu bylo zjištěno, že při využití sítko množství bublin stouplo, přičemž došlo ke snížení jejich velikosti. Aplikace sítko tedy má své využití a mohlo by se využít například při pěstování rostlin ve vodě nebo při flotaci uhlí.

Téma bakalářské práce bylo velmi zajímavé a každá z podkapitol v kapitole 4 by si pro svou zajímavost a obsáhlost zasloužila zpracování své vlastní bakalářské práce. Zpracování zadaného tématu vytváří základ pro navazující diplomovou práci.

9 Seznam použitých zdrojů

1. [AGARWAL, Ashutosh, Wun Jern NG a Yu LIU. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere* [online]. 0110n. 1., **84**(9), 1175 [cit. 2016-02-01]. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.05.054. dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653511006242>]
2. [ATTARD, Phil. *Nanobubbles: The big picture* [online]. [cit. 2015-11-14]. Dostupné z: <http://personal.chem.usyd.edu.au/Phil.Attard/a79/epic.pdf>]
3. [ATTARD, Phil. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2003, **104**(1-3) [cit. 2015-11-14]. ISSN 00018686. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000186860300037X>]
4. [ATTARD, Phil. *Thermodynamic Stability of Nanobubbles* [online]. 2015 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://arxiv.org/abs/1503.04365v1>]
5. [BRDIČKA, Miroslav, Oldřich TARABA a Ladislav SAMEK. *Kavitace: diagnostika a technické využití*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981. Technická knihnice inženýra.]
6. [BURNS, S.E., S. YIACOUMI a C. TSOURIS. Microbubble generation for environmental and industrial separations. *Separation and Purification Technology* [online]. Elsevier B.V, 1997, **11**(3), 221-232 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/S1383-5866(97)00024-5. ISSN 1383-5866. dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586697000245>]
7. [FRANC, Jean-Pierre a Jean-Marie MICHEL. *Fundamentals of cavitation* [online]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004 [cit. 2016-03-07]. ISBN 14-020-2233-6. Dostupné z: <http://www.springer.com>]
8. [HAMPTON, M.A. a A.V. NGUYEN. Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2010, **154**(1), 30-55 [cit. 2016-04-10]. DOI: 10.1016/j.cis.2010.01.006. ISSN 0001-8686. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868610000084>]

9. [CHAN, Chon U, Longquan CHEN, Manish ARORA a Claus-Dieter OHL. Collapse of surface nanobubbles. *Physical review letters* [online]. 2015, **114**(11), 114505 [cit. 2016-02-19].
dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/272833707_Collapse_of_Surface_Nanobubbles
]
10. [CHAPLIN, Martin. Nanobubbles. *London South Bank University* [online]. [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://www1.lsbu.ac.uk/water/nanobubble.html>]
11. [IKEURA, H., F. KOBAYASHI a M. TAMAKI. Removal of residual pesticide, fenitrothion, in vegetables by using ozone microbubbles generated by different methods. *Journal of Food Engineering* [online]. 2011, **103**(3), 345-349 [cit. 2016-05-18]. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.11.002. ISSN 02608774.
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026087741000539X>]
12. [JYOTI, K.K a A.B PANDIT. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal* [online]. 2001, **7**(3), 201-212 [cit. 2016-01-31]. DOI: 10.1016/S1369-703X(00)00128-5. ISSN 1369703X.
dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X00001285>]
13. [KUBINA, D. Kavitujuce prudenie v perforovanom disku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 80 s. Vedúci bakalárskej práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.]
14. [KUTINOVÁ, Blanka, Irena ŠELEPOVÁ, Josef ŽÁK a Otto LEVINSKÝ. *Technický naučný slovník: 2.díl*. Druhé, revidované a doplněné vydání. Praha: SNTL, 1982, s. 240.]
15. [KUTINOVÁ, Blanka, Irena ŠELEPOVÁ, Josef ŽÁK a Otto LEVINSKÝ. *Technický naučný slovník: 3.díl*. Druhé, revidované a doplněné vydání. Praha: SNTL, 1982, s. 66.]
16. [LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-384-4.]
17. [MAALI, Abdelhamid a Bharat BHUSHAN. Nanobubbles and their role in slip and drag. *Journal of Physics: Condensed Matter* [online]. 2013, **25**(18), 184003 [cit. 2016-05-24]. DOI: 10.1088/0953-8984/25/18/184003. ISSN 0953-8984.
dostupné z: <http://iopscience.iop.org/ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1088/0953-8984/25/18/184003/meta>]

18. [MØRCH, K. A. Cavitation inception from bubble nuclei. *Interface Focus* [online]. 2015, **5**(5), 20150006- [cit. 2016-02-19]. DOI: 10.1098/rsfs.2015.0006. ISSN 2042-8898.
Dostupné z: <http://rsfs.royalsocietypublishing.org/lookup/doi/10.1098/rsfs.2015.0006>]
19. [NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. 1. vyd. Praha. ISBN 80-030-0206-0.]
20. [NOSKIEVIČ, Jaromír. *Kavitace*. 1. vyd. Praha: Academia, 1969, 278 s.]
21. [OHGAKI, Kazunari, Nguyen Quoc KHANH, Yasuhiro JODEN, Atsushi TSUJI a Takaharu NAKAGAWA. Physicochemical approach to nanobubble solutions. *Chemical Engineering Science* [online]. 2010, **65**(3), 1296-1300 [cit. 2016-04-10]. DOI: 10.1016/j.ces.2009.10.003. ISSN 0009-2509
dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250909007052>]
22. [PARK, Jong-Seok a Kenji KURATA. Application of Microbubbles to Hydroponics Solution Promotes Lettuce Growth. *HortTechnology* [online]. 2009, **19**, 212-215 [cit. 2016-04-12]. ISSN 1063-0198.
dostupné z: <http://horttech.ashspublishings.org/content/19/1/212.full.pdf+html?sid=7e42ca82-f58e-4aac-916f-de042ca7bb5f>]
23. [PLESSET, M. S a A. T ELLIS. CALIFORNIA INST OF TECH PASADENA HYDRODYNAMICS LAB. *ON THE MECHANISM OF CAVITATION DAMAGE*. 1954.]
24. [PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.* 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003, s. 180-197. ISBN 80-7204-283-1.]
25. [SOBHY, Ahmed a Daniel TAO. High-Efficiency Nanobubble Coal Flotation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization* [online]. Taylor, 2013, **33**(5), 242-256 [cit. 2016-02-07]. DOI: 10.1080/19392699.2013.810623. ISSN 19392699.
dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19392699.2013.810623>]
26. [TESAŘ, Václav. Microbubble Generation by Fluidics. Part II: Bubble Formation Mechanism. In Jonáš, P.; Uruba, V. (ed.). *Colloquium FLUID DYNAMICS 2012*. Praha : Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., 2012, S. 31-32. ISBN 978-80-87012-42-0. [Colloquium FLUID DYNAMICS 2012, Praha, 24.10.2012-26.10.2012, CZ] (citace dle: http://www.library.sk/arl-cav/en/detail/?zf=CAV_BIBCIT&idx=cav_un_epca*0382349)
dostupné z: http://www.it.cas.cz/files/u1868/tesar2_F.pdf]

27. [USHIKUBO, Fernanda Yumi, Takuro FURUKAWA, Ryou NAKAGAWA, Masatoshi ENARI, Yoshio MAKINO, Yoshinori KAWAGOE, Takeo SHIINA a Seiichi OSHITA. Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. 2010, **361**(1), 31-37 [cit. 2016-04-19]. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.03.005. ISSN 0927-7757.]
dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775710001779>]
28. [VOJTA, Filip. Princip laseru. *Pedagogická fakulta Jihočeské univerzity: Fakulta fyziky* [online]. České Budějovice, 2003 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>]
29. [WEIJS, Joost H. a Detlef LOHSE. Why Surface Nanobubbles Live for Hours. In: *Physical Review Letters* [online]. 2013, **110**(5), - [cit. 2015-11-17]. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.054501. ISSN 0031-9007. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.054501>]
30. [WU, Chendi, Kirsten NESSET, Jacob MASLIYAH a Zhenghe XU. Generation and characterization of submicron size bubbles. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2012, **179-182**, 123-132 [cit. 2016-02-08]. DOI: 10.1016/j.cis.2012.06.012. ISSN 0001-8686.
dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868612000942>]
31. [YU, Xiong a Peng FELICIA. Optimization of cavitation venturi design for pico-nano and nanobubbles generation. *International Journal of Mining Science and Technology* [online]. Elsevier B.V, 2015 [cit. 2016-04-05]. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.05.002. ISSN 2095-2686
dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268615000853>]

10 Seznam použitých symbolů a zkratek

BHIA		baffled high intensity agitation
C	$[kgm^{-3}]$	koncentrace ve velké vzdálenosti od bubliny
C_s	$[kgm^{-3}]$	koncentrace při nasycení
CLs		metoda ustupujících kontaktních linií
c	$[kgm^{-3}]$	okamžitá objemová koncentrace uvažované látky
D	$[m^{-2}s^{-1}]$	koeficient difuze uvažované látky
DAF		dissolved air flotation
g	$[ms^{-2}]$	tíhové zrychlení
H_i	$[-]$	Henryho konstanta pro složku i
J	$[kgm^{-2}s^{-1}]$	difuzní tok
NB		nanobublina
p_g	$[Pa]$	tlak par
p_{hyd}	$[Pa]$	hydrostatický tlak
p_i	$[Pa]$	parciální tlak složky i v plynné fázi
p_{kap}	$[Pa]$	kapilární tlak
p_{NP}	$[Pa]$	tlak nasycených par
p_u	$[Pa]$	tlak uvnitř bubliny
p_v	$[Pa]$	tlak vně bubliny
p_x	$[Pa]$	tlak v daném místě
p_y	$[Pa]$	tlak v daném místě

R_1	$[m]$	poloměr křivosti 1
R_2	$[m]$	poloměr křivosti 2
v	$[ms^{-1}]$	rychlost proudu v daném průřezu
$v_{zd.}$		vzduch
x_i	$[-]$	molární zlomek složky i v kapalné fázi
ξ	$[-]$	ztrátový součinitel
ρ	$[kgm^{-3}]$	hustota kapaliny
ρ_g	$[kgm^{-3}]$	hustota plynu
σ	$[Nm^{-1}]$	povrchové napětí na rozhraní mezi látkou A a B
σ_v	$[-]$	kavitační součinitel
σ_{vi}	$[-]$	kavitační součinitel označující počátek kavitace
τ	$[s]$	doba difuze
∇		Hamiltonův operátor nabla

11 Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Tlak v okolní kapalině v závislosti na poloměru bubliny [7, 19]	17
Obr. 2: Superkavitace [7]	20
Obr. 3: DAF [11]	23
Obr. 4: BHIA [30]	23
Obr. 5: Venturiho dýza [31]	24
Obr. 6: aerátor [26]	25
Obr. 7: působení kontaktní linie na a) povrchovou nanobublinu, b) polymerní kapku, c) pevnou částici [9]	28
Obr. 8: Ukázka ukotvené nanobubliny [4]	29
Obr. 9: Ukázka povrchové nanobubliny a jejich rozměrů [29]	30
Obr. 10: Princip hydroponie [22]	35
Obr. 11: Změna ve vzrůstu salátu, vlevo užití makrobublin, vpravo mikrobublin [22]	36
Obr. 12: Rozměry otvoru [13]	38
Obr. 13: Upravená Venturiho dýza	39
Obr. 14: Kavitační jádra	40
Obr. 15: Množství jader po kavitaci	40
Obr. 16: grafická analýza	41
Obr. 17: Okruh [13]	42
Obr. 18: plexisklová trubice [13]	43
Obr. 19: Sítko	43
Obr. 20: Kavitace při průchodu otvorem z Obr. 12, $\sigma_v = 0,55$ [13]	44
Obr. 21: Kavitace při sítku na přetlakové straně, $\sigma_v = 0,60$	45
Obr. 22: Kavitace při sítku na podtlakové straně, $\sigma_v = 0,55$	45
Obr. 23: Kavitace při sítku na obou stranách s prostorem vyplněným měděnou drátěnkou....	45
Obr. 24: Graf závislosti ztrátového součinitele na kavitačním čísle - přetlak	46
Obr. 25: Graf závislosti ztrátového součinitele na kavitačním čísle – podtlak	46
Obr. 26: Bublínkový polštář při kavitačním součiniteli a) $\sigma = 0,67$, b) $\sigma = 0,31$	47
Obr. 27: Roztříštěná superkavitace	48
Obr. 28: Superkavitace při sestavení dle Obr. 12 [13]	48

12 Seznam příloh

12.1 Příloha A

Video zachycující vývin kavitace při umístění sítka na přetlakové straně příruby.

12.2 Příloha B

Video zachycující vývin kavitace při umístění sítka na podtlakové straně příruby.

12.3 Příloha C

Video zachycující vývin kavitace při umístění sítěk na podtlakovou i přetlakovou stranu příruby, přičemž meziprostor je vyplněn měděnou drátěnkou.

Ve všech videích platí následující označení: I_JKL_MNO(P)

kde: I nabývá hodnot 1 až 3, 1 = přetlaková strana, 2 = podtlaková strana, 3 = obě strany + drátěnka

$JKL = \text{průtok} \times 100 \text{ [ls}^{-1}\text{]}$

$MNO(P) = \text{počet otoček [min}^{-1}\text{]}$